

VISIT...

LANZAROTE
Caliente.COM

VASILE HOBJILĂ, MIHAIL LUCA
AMEDEO MITROI

**REZERVOR CIRCULAR DIN BETON
PRECOMPRIAT CU FASCICULE
POSTÎNTINSE SEGMENTATE**

●
ELEMENTE DE CALCUL HIDRAULIC ȘI STATIC

*D-lui profesor Dumitru Arsenie
-cu multa stimă și considerație.*

M Luca

Editura CERMI Iași
Str. Curelari nr. 16
6600 Iași
Tel./Fax 032/116604
Mobil 092533257

VASILE HOBJILĂ, MIHAIL LUCA, AMEDEO MITROI
REZERVOR CIRCULAR DIN BETON PRECOMPRIMAT
CU FASCICULE POSTÎNTINSE SEGMENTATE
• *ELEMENTE DE CALCUL HIDRAULIC ȘI STATIC*

Consilier editorial: Prof. dr. ing. Emanoil BÂRSAN

COPYRIGHT © 1999
Toate drepturile asupra acestei ediții sunt rezervate autorilor.

ISBN 973-9378-97-8
973-9378-98-6

Vasile Hobjilă, Mihail Luca
Amedeo Mitroi

REZERVOR CIRCULAR DIN BETON
PRECOMPRIMAT CU FASCICULE
POSTÎNTINSE SEGMENTATE

VOL. I

ELEMENTE DE CALCUL HIDRAULIC ȘI STATIC

Editura și Tipografia CERMI
Iași, 1999

Contribuțiile la elaborarea lucrării:

- Prof. univ. dr. ing. Vasile Hobjilă - capitolele 4,5 și 6;
- Prof. univ. dr. ing. Mihail Luca - capitolele 1,2 și 3;
- Șef lucr. drd. ing. Amedeo Mitroi - parțial, capitolele 2 și 4.

Referenți științifici:

* Prof. univ. dr. ing. Iosif Bartha

* Prof. univ. dr. ing. Marcel Patraș

Universitatea Tehnică "Gh. Asachi" Iași

*Lucrare editată cu sprijinul material al Societății Comerciale
"POLIASCAS" S.A. Iași.*

Tehnoredactare computerizată:

** Fizician licențiat cu studii aprofundate Iuliana Mihaela Luca

** Tehnician Ana Didea

Grafică:

*** Inginer licențiat cu studii aprofundate Carmen Arsenie

Iași, august, 1999

PREFAȚĂ

Lucrarea "REZERVOR CIRCULAR DIN BETON PRECOMPRIMAT CU FASCICULE POSTÎNTINSE SEGMENTATE", structurată în 3 volume diferențiate prin conținut, este destinată studenților de la secțiile *CONSTRUCȚII HIDROTEHNICE* și *INGINERIE SANITARĂ ȘI PROTECȚIA MEDIULUI* ale Facultății de HIDROTEHNICĂ din cadrul **Universității Tehnice "Gh. Asachi" din Iași.**

Lucrarea, care este adresată mai ales studenților din anii terminali, poate fi utilă și inginerilor de profil care activează în domeniul de proiectare, cercetare și exploatare a lucrărilor hidroedilitare.

Autorii au dorit să sistematizeze bazele teoretice și practice de proiectare, în concordanță cu cele mai noi metode de calcul pentru rezervoarele din beton armat și beton precomprimat, precum și pentru instalațiile hidraulice aferente. Totodată, lucrarea pune la dispoziția viitorilor ingineri un material unitar (pentru proiectare integrală), bazat pe elemente teoretice și tehnologice, respectiv simulări numerice adecvate, efectuate manual sau cu programe de calcul automat.

Domeniul abordat în lucrare, care cuprinde părți din proiectele de an și licență ale studenților de la secțiile menționate, este de strictă actualitate pentru **proiectarea și exploatarea sistemelor de alimentare cu apă** din România, cu referire în principal la rezervoarele din beton armat și beton precomprimat. Construcțiile de acest tip, care dețin o pondere importantă din investiția inițială și condiționează calitatea serviciilor oferite de sistemul de alimentare cu apă, implică soluții constructive capabile să asigure preluarea acțiunilor previzibile și a celor aleatoare.

Evoluția tehnică și științifică în acest domeniu, precum și a metodelor de calcul, impune considerarea în faza de verificare a proiectului a unor ipoteze noi de încărcare, care completează pe cele clasice, în scopul diminuării riscului de cedare, dependent de evoluția în timp a calităților materialelor asociate și de conlucrarea construcției cu mediul de rezemare sau de înglobare.

În volumul 1, cu subtitlul "**ELEMENTE DE CALCUL HIDRAULIC ȘI STATIC**", sunt evidențiate exigențele construcțiilor pentru înmagazinarea apei, **dimensionarea capacităților** acestora și **proiectarea instalațiilor hidraulice** conexe. De asemenea, sunt prezentate principalele **sisteme constructive și tehnologiile de realizare** pentru rezervoarele din beton cu dimensiuni medii și mari, respectiv detalierea unor aspecte privind **analiza structurală** clasică a rezervoarelor circulare sub acțiuni statice.

Elementele de calcul prezentate se referă la rezervoarele de înmagazinare a apei, cu o largă aplicare în sistemele regionale și urbane de alimentare cu apă. Importanța acestor lucrări în funcționarea normală a sistemului de alimentare cu apă impune o dimensionare optimă a construcțiilor și instalațiilor aferente. Aceasta are ca scop obținerea unei siguranțe sporite în exploatare și evitarea apariției fenomenelor de cedare.

Pentru început se acordă o importanță sporită modului de dimensionare a volumului rezervorului de înmagazinare, cu luarea în considerare a ultimelor date de calcul menționate în standarde și normativele aflate în vigoare. De asemenea, se precizează o serie de elemente de calcul hidraulic pentru componentele instalației existente în camera vanelor și în stațiile de pompare adosate rezervoarelor.

Pentru o mai bună aplicabilitate a lucrării se prezintă o serie de scheme, metode și relații semnificative de calcul, precum și materialul ajutător în proiectarea instalațiilor hidraulice (coeficienți de calcul, grafice, nomograme, tabele cu valori etc). Pentru instalația hidraulică, din cadrul stației de pompare, autorii au crezut de cuviință să prezinte o serie de

date necesare unei mai bune înțelegeri a modului de proiectare și exploatare pentru astfel de lucrări.

Volumul 2 al lucrării cuprinde "**PROIECTAREA ȘI VERIFICAREA PRIMARĂ A STRUCTURII DE REZISTENȚĂ**" pentru un rezervor circular din beton, cu referire la peretele cilindric din beton precomprimat cu **fascicule postîntinse segmentate** și la elementele prefabricate de acoperire precomprimate cu **armătură preîntinsă**. Exemplul de calcul elaborat prezintă un caracter didactic evident, prin modul de abordare și detalieri a calculului eforturilor secționale și secțiunilor critice numai la acțiuni statice. În partea finală a volumului 2 se prezintă **calculul seismic simplificat al rezervorului circular** în interacțiune cu apa, respectiv verificările specifice la acțiuni laterale.

În **volumul 3**, cu subtitlul "**ANALIZA COMPORTĂRII MECANICE ȘI HIDRAULICE LA ACȚIUNI SPECIALE**", se evidențiază elemente avansate de calcul static și seismic pentru un rezervor din beton armat/beton precomprimat, utile inginerilor licențiați ce urmează forma de perfecționare profesională prin studii aprofundate (anul VI), în specializarea "Siguranța în exploatare a construcțiilor hidrotehnice".

În capitolele volumului 3 sunt evidențiate metodele de calcul pentru rezervoarele circulare în interacțiune cu apa și terenul de fundare, la acțiuni seismice majore, respectiv pentru conducta de aducțiune din BP considerată în exploatare sau în condiții de avarie. De asemenea, se analizează, teoretic și numeric, comportarea construcției la acțiuni nesimetrice, folosind metode clasice de calcul sau metoda generală de analiză cu elemente finite.

În mod special se efectuează **simularea răspunsului rezervorului** la acțiuni seismice majore (de verificare) în amplasament, tasări diferențiate excesive, încărcări nesimetrice din împingerea pământului, precum și evoluția stărilor de deformății și tensiuni la **execuția precomprimării peretelui cilindric cu fascicule postîntinse segmentate**, aparținând unor inele discrete.

Conductele de alimentare și distribuție aferente rezervorului sunt analizate prin prisma comportării la unele evenimente rare, care implică situații deosebite de risc.

La elaborarea lucrării a fost valorificată o amplă bibliografie, de la manualele clasice până la articole de specialitate, precum și experiența autorilor în acest domeniu. Pentru a suplini lipsa unor îndrumare adecvate de calcul, lucrarea conține și elementele necesare efectuării aplicațiilor numerice.

Sub aspect pedagogic, s-a considerat că este necesară detalierea metodelor și rezultatelor pe parcursul celor 3 volume, pentru o însușire ușoară și completă.

Autorii sunt receptivi la orice observație critică și sugestie, care ar permite îmbunătățirea științifică și completarea conținutului acestei lucrări.

Autorii mulțumesc în mod deosebit referenților științifici, prof. univ. dr. ing. Iosif Bartha și prof. univ. dr. ing. Marcel Patraș pentru amabilitatea de a analiza lucrarea, pentru observațiile și completările aduse.

Autorii

CUPRINS

PREFAȚĂ	3
Cap.1. Exigențele construcțiilor pentru înmagazinarea apei	13
1.1. Schema sistemului de alimentare cu apă	13
1.2. Funcțiile rezervorului în cadrul sistemului de alimentare cu apă	18
1.3. Tipuri și forme pentru rezervoare	20
1.4. Materiale de execuție	24
1.5. Elemente privind exploatarea rezervoarelor de înmagazinare a apei	25
Bibliografie	26
Cap.2. Proiectarea capacității rezervoarelor	27
2.1. Structura capacității rezervoarelor	27
2.2. Determinarea debitelor de calcul	28
2.2.1. Metodica de calcul	28
2.2.2. Exemplul de calcul nr.2.1. Determinarea debitelor de calcul	32
2.3. Debitele de dimensionare pentru schema de alimentare cu apă	33
2.4. Determinarea volumului de compensare	35
2.4.1. Considerații teoretice și metodica de calcul	35
2.4.2. Exemple de calcul	40
2.4.2.1. Exemplul nr.2.2. Metoda aproximativă de calcul	40
2.4.2.2. Exemplul nr.2.3. Metoda analitică de calcul	40
2.4.2.3. Exemplul nr.2.4. Metoda grafică de calcul	41
2.5. Determinarea volumului de apă pentru avarii	44
2.5.1. Considerații teoretice și metodica de calcul	44
2.5.2. Exemplu de calcul nr.2.5. Determinarea volumului de avarie	45
2.6. Determinarea volumului de apă pentru rezerva de incendiu	47
2.6.1. Considerații teoretice și metodica de calcul	47
2.6.2. Exemple de calcul	51
2.6.2.1. Exemplul nr.2.6. Determinarea debitelor de incendiu	51

2.6.2.2. Exemplul nr.2.7. Determinarea volumului rezervei intangibile de apă pentru incendiu	52
2.7. Calculul volumului de apă al rezervorului de acumulare.....	54
2.7.1. Considerații teoretice și metodica de calcul	54
2.7.2. Exemplul de calcul nr.2.8. Determinarea volumului pentru rezervorul care deservește un sistem de alimentare cu apă aferent unei localități cu o populație de 38.000 locuitori.....	55
Bibliografie	57
Cap.3. Proiectarea instalației hidraulice	59
3.1. Structura instalației hidraulice	59
3.1.1. Elemente structurale pentru rezervoare.....	59
3.1.2. Modalități tehnice pentru distribuția apei la sistemul deservit sau consumator	61
3.1.3. Structura instalației hidraulice.....	69
3.2. Elemente de calcul hidraulic.....	71
3.2.1. Parametrii generali de calcul	71
3.2.2. Parametrii de stare fizică ai apei.....	72
3.2.3. Calculul presiunilor și forțelor de presiune	74
3.2.3.1. Presiuni caracteristice în instalațiile hidraulice.....	74
3.2.3.2. Calculul forțelor de presiune.....	75
3.2.3.3. Calculul grosimii pereților la conducte și rezervoare	76
3.2.4. Calculul pierderilor de sarcină	79
3.2.4.1. Clasificarea pierderilor de sarcină	79
3.2.4.2. Calculul pierderii de sarcină distribuită	81
3.2.4.3. Calculul pierderilor de sarcină locală	87
3.3. Calculul hidraulic al conductelor	99
3.3.1. Relații generale și modele de calcul	99
3.3.2. Calculul conductelor hidraulic scurte	101
3.3.3. Calculul conductelor hidraulic lungi.....	105
3.3.3.1. Relații generale de calcul	105
3.3.3.2. Conducte lungi cu tronsoane montate în serie.....	106
3.3.3.3. Conducte lungi cu tronsoane montate în paralel	107
3.3.3.4. Conducte cu debite uniform distribuite	110
3.3.4. Caracteristica hidraulică a conductei	112
3.3.4.1. Caracteristica hidraulică a conductei gravitaționale	112

3.3.4.2. Caracteristica hidraulică a conductei de pompare	114
3.3.4.3. Caracteristica hidraulică a conductei cu tronsoane montate în serie	115
3.3.4.4. Caracteristica hidraulică a conductei cu tronsoane montate în paralel	116
3.3.5. Funcționarea conductelor gravitaționale în funcție de poziția liniei piezometrice.....	117
3.3.6. Parametrii de funcționare ai sistemului hidraulic	120
3.3.6.1. Parametrii de funcționare la conductele gravitaționale. Punct de funcționare.....	120
3.3.6.2. Parametrii de funcționare la conductele instalațiilor de pompare. Punct de funcționare	122
3.3.6.3. Variația presiunii apei în conducte.....	125
3.4. Golirea rezervoarelor.....	135
3.5. Elemente de calcul hidraulic la instalația rezervoarelor de înmagazinare a apei reci	138
3.5.1. Considerații generale	138
3.5.2. Conducta de alimentare a rezervorului. Dimensionarea robinetelor cu plutitor	142
3.5.3. Conducta de preaplin	145
3.5.4. Dimensionarea conductei de golire. Timp de golire	148
3.6. Elemente de calculul pentru instalația de pompare aferentă rezervoarelor de acumulare a apei reci	150
3.6.1. Considerații generale	150
3.6.2. Structura stației de pompare	150
3.6.2.1. Linia tehnologică interioară a stației de pompare.....	150
3.6.2.2. Agregatele de pompare.....	153
3.6.2.3. Instalațiile hidraulice de bază și auxiliare	154
3.6.2.4. Instalații auxiliare.....	157
3.6.2.5. Instalații electrice.....	158
3.6.3. Utilajul de pompare	159
3.6.3.1. Tipuri și clasificarea pompelor	159
3.6.3.2. Parametri de funcționare ai turbopompelor.....	161
3.6.3.3. Pompe utilizate în stațiile de pompare adosate rezervoarelor pentru înmagazinarea apei	163
3.6.4. Curbele caracteristice turbopompelor	165

3.6.5. Utilizarea pompelor în instalații	168
3.6.5.1. Criterii de alegere a turbopompelor	168
3.6.5.2. Caracteristica hidraulică a instalației. Parametri de funcționare ai pompei în instalație	169
3.6.5.3. Cuplarea pompelor în funcționare	170
3.6.5.4. Funcționarea pompelor în stația de pompare	172
3.6.5.5. Reglarea debitului în instalația de pompare	174
3.6.5.6. Reglarea debitului prin modificarea turației pompei	176
3.6.6. Exploatarea pompelor fără regim de cavitație	178
Bibliografie	179
ANEXA 3 Tabele, grafice și nomograme de calcul hidraulic	181
Anexa. 3.1. Valorile rugozității absolute echivalente pentru conducte	182
Anexa. 3.2. Coeficienții de rugozitate n din formulele Manning, Pavlovski și Ganguillet – Kutter pentru conducte și galerii	184
Anexa. 3.3 Coeficientul lui Darcy $\lambda = f(Re, k/D)$. Diagrama lui Moody	186
Anexa. 3.4 Grafic $J = f(Q, D)$ la tuburile din metal și PREMO după formula lui Manning ($1/n = 83$)	187
Anexa. 3.5 Grafic $J = f(Q, D)$ la tuburile din beton prefabricat după formula lui Manning ($1/n = 74$)	188
Anexa. 3.6 Grafic $J = f(Q, D)$ la tuburile din azbociment după formula lui Manning ($1/n = 90$)	189
Anexa. 3.7 Grafic $J = f(Q, D)$ la tuburile din PVC după formula Colebrook – White ($n = 0,01$)	190
Anexa. 3.8 Diagrama $\lambda = f(Q, D)$ pentru conducte noi din oțel	191
Anexa. 3.9 Diagrama $\lambda = f(Q, D)$ pentru conducte noi din fontă	192
Anexa. 3.10 Diagrama $\lambda = f(Q, D)$ pentru conducte vechi din fontă și oțel	193
Anexa. 3.11. Valorile modului de debit K pentru conducte	194
Anexa. 3.12. Coeficienții de rezistență locală $\zeta_c = f(\delta, R, l/d, n)$ la cotelile de conductă executate din segmente	195
Anexa. 3.13 Coeficientul de rezistență locală ζ_i la intrarea dreaptă în conductă	196
Anexa. 3.14 Coeficientul de rezistență locală $\zeta_v = f(a/D)$ la un robinet tip sertar	197
Anexa. 3.15 Coeficientul de rezistență locală $\zeta_f(\theta)$ la un robinet tip fluture	198

Cap.4. Sisteme constructive pentru rezervoare și construcții asimilabile acestora	199
4.1. Considerații generale	199
4.2. Sisteme constructive reprezentative	202
Cap.5. Tehnologii speciale la execuția rezervoarelor	243
5.1. Exigențe privind alcătuirea constructivă a rezervoarelor	266
5.2. Exigențe privind instalațiile hidraulice	275
5.3. Realizarea exigențelor privind etanșeitatea, izolarea termică, izolarea hidrofugă exterioară și protecția anticorozivă	276
5.4. Verificarea calității lucrărilor și remedierea defectelor de execuție ..	287
5.5. Date și condiții ce trebuie specificate în planșe și în caietul de sarcini	289
Cap.6. Elemente privind calculul static și dinamic/seismic al rezervoarelor cilindrice	291
6.1. Metode aproximative de calcul	293
6.2. Metode analitice exacte de calcul	294
6.3. Calculul seismic simplificat al rezervoarelor cilindrice	313
6.3.1. Calculul rezervoarelor cilindrice la variația de temperatură	322
6.3.2. Calculul seismic al rezervoarelor cilindrice după cod [6]	325
6.3.3. Verificarea rezervoarelor la stabilitate generală	333
6.3.4. Exigențe privind amplasamentul și terenul de fundare	336
Anexa 6.1. Acțiunea încărcării uniform distribuite " r " la marginea inferioară	338
Anexa 6.2. Acțiunea momentului uniform distribuit " m " la marginea inferioară	339
Anexa 6.3. Acțiunea încărcării uniform distribuite " $\bar{r}$ " la marginea superioară	340
Anexa 6.4. Acțiunea momentului uniform distribuit " $\bar{m}$ " la marginea superioară	341
Anexa 6.5. Reacțiuni la contactul perete cilindric – - acoperiș flexibil	342
Anexa 6.6. Reacțiuni la contactul perete cilindric – placă rigidă la bază	342

Anexa 6.7. Reacțiuni la contactul perete cilindric – placă inelară exterioară la marginea superioară a rezervorului	343
Anexa 6.8. Reacțiuni la contactul perete cilindric – placă flexibilă de bază	344
Anexa 6.9. Linii de influență pentru precomprimarea inelară	345
Anexa 6.10. Eforturi secționale în “starea de membrană”	350
Anexa 7. Stabilirea rigidităților “reale” pentru calculul eforturilor produse de variațiile de temperatură	351
Anexa 8. Valorile admisibile pentru deschiderea fisurilor și a eforturilor remanente de compresiune în pereții rezervoarelor cilindrice	352
6.4. Calculul rezervoarelor cilindrice speciale	353
6.4.1. Calculul pereților rezervoarelor cilindrice la încărcări axial simetrice	354
6.4.1.1. Perete cu grosime constantă	357
6.4.1.2. Pereți cu secțiune variabilă	362
6.4.2. Determinarea presiunii produse de inelele de armătură pretensionată pe placa cilindrică	368
6.4.2.1. Presiunea înfășurării asupra plăcii curbe de lungime infinită	372
6.4.2.2. Presiunea armăturii pretensionate înfășurate pe pânzele cilindrice cu lungime finită	375
6.4.2.2.1. Exemple de calcul	379
6.4.3. Calculul pereților rezervoarelor cilindrice la încărcări nesimetrice	388
6.4.4. Presiunea seismică a lichidului	395
6.4.5. Forța concentrată P aplicată continuu pe marginea superioară a rezervorului	396
6.4.6. Determinarea deplasării după teoriile de membrană și de încovoiere	397
6.4.7. Calculul rezervoarelor la acțiunea temperaturii	418
6.4.8. Calculul inelelor de rezemare și de fundație	429
6.4.9. Calculul radierelor plane ale rezervoarelor	437
Anexa VI. Comentarii la relațiile de calcul static al rezervoarelor	456
Referințe bibliografice	481

CAPITOLUL 1

EXIGENȚELE CONSTRUCȚIILOR PENTRU ÎNMAGAZINAREA APEI

1.1. SCHEMA SISTEMULUI DE ALIMENTARE CU APĂ

Sistemul de alimentare cu apă a consumatorilor individuali sau multipli este un complex de construcții și instalații, care asigură preluarea din sursă a apei, transportul și distribuția acesteia la beneficiari, precum și execuția operațiilor de îmbunătățire a calității conform cerințelor beneficiarilor. Prin destinația sa, sistemul de alimentare cu apă se află într-o continuă funcționare și dezvoltare. Extinderea continuă a sistemului de alimentare cu apă pe parcursul a zeci de ani determină folosirea unor concepții diferite în procesul de proiectare și înglobarea unui volum mare și extrem de diversificat de materiale la execuție.

Schema generală a unui sistem de alimentare cu apă este structurată pe următoarele elemente principale (fig.1.1, [1]):

- a** - construcții de captare a apei din sursa naturală sau artificială;
- b** - stații de pompare, cu poziții diferite în cadrul sistemului, aspect care le determină și funcția (de bază, repompare, ridicare de presiune, recirculare etc);
- c** - conducte de transport (aducțiuni) ale apei între diferitele elemente ale sistemului (în principal între captare - stație pompare - rezervoare);
- d** - construcții și instalații de îmbunătățire a parametrilor apei distribuite la beneficiar;
- e** - rezervoare, deschise sau închise, cu nivel liber sau sub presiune și cu funcții diferite;

f - rețele de transport și distribuție (primare și secundare) pe care se află branșamente și o serie de instalații specifice etc.

Schema generală a sistemului se particularizează conform cerințelor consumatorului, precum și condițiilor oferite de sursă, teritoriu și relieful acestuia. În general, apa este preluată din sursă (captare de izvoare, râu, lac, canal etc) printr-o construcție tip "priză", iar prin transport gravitațional, sau prin pompare (treapta a I-a de pompare) este trimisă spre stația de tratare sau rezervorul de înmagazinare.

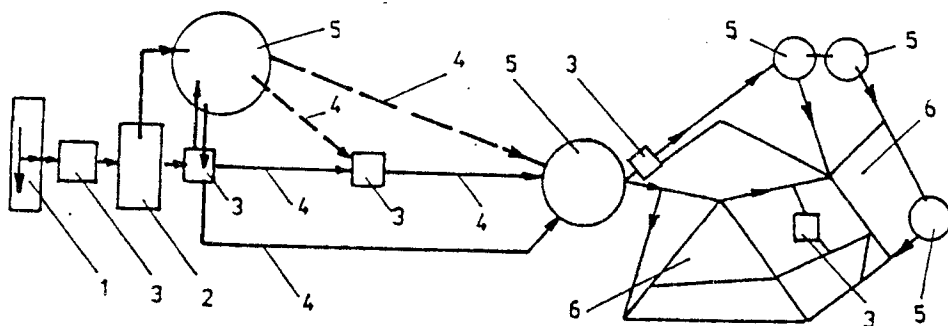


Fig.1.1. Schema generală a sistemului de alimentare cu apă:
1-sursă - priză de apă; 2 - stație de tratare; 3 - stație de pompare;
4 - conductă de aducțiune; 5 - rezervor; 6 - rețea de distribuție.

După tratare, conform cerințelor beneficiarului (apă potabilă, apă industrială, apă de ungere etc), apa este acumulată și înmagazinată în rezervoare. De la rezervorul de înmagazinare apa este transportată la obiectivul alimentat cu ajutorul unor conducte gravitaționale, sau cu una sau mai multe conducte sub presiune, scop în care se folosește o stație de pompare (treapta a II-a de pompare). Conductele de refulare din treapta a II-a de pompare alimentează rețeaua de distribuție, sau un rezervor, prin a cărui cotă piezometrică se asigură necesarul de presiune al consumatorilor.

Alegerea schemei de alimentare este influențată de o serie de factori, dintre care un rol important îl dețin:

- - relieful terenului și poziția sursei;
- - gradul de extindere teritorială a obiectivului;
- - tipul sursei, disponibilul acesteia și calitatea apei prelevate;
- - mărimea debitelor necesare și valoarea presiunilor de serviciu în rețeaua de distribuție;
- - calitatea apei solicitată de beneficiari;
- condițiile tehnico-economice și sociale, perspectiva de dezvoltare etc.

Relieful terenului are o influență importantă asupra modului de alcătuire a schemei sistemului de alimentare cu apă (fig.1.2.). Acesta poate determina renunțarea, sau multiplicarea unor elemente componente ale sistemului. În acest caz, rezervoarele pot ocupa diverse poziții în raport cu cota terenului.

Fată de nivelul terenului, rezervoarele pot fi sub acesta (îngropate, semiîngropate), la suprafață și supraterane, respectiv la o cotă dominantă (castel de apă). Modul de amplasare le determină și funcția în cadrul sistemului: înmagazinare, rupere de presiune, asigurarea de presiune etc.

La poziționarea rezervoarelor se va avea în vedere încadrarea corespunzătoare a acestora în schema tehnologică a sistemului de alimentare cu apă. De asemenea, se va ține cont de condițiile de fundare și stabilitate generală și locală a terenului. Terenurile instabile, cu proprietăți mecanice proaste (macroporice, tasabile, cu apă la suprafață, capacitate portantă redusă etc.) și cu tendințe de alunecare la încărcări superioare, vor fi evitate la amplasarea rezervoarelor și castelelor de apă.

În cadrul schemei de alimentare cu apă pot fi prevăzute unul, sau mai multe rezervoare, care pot ocupa poziții diferite, în funcție de destinația lor și modul de transmisie al apei în sistemul hidraulic (gravitațional, prin pompare și mixt).

Pentru minimizarea investițiilor se preferă ca rezervorul să fie amplasat în zona centrală a sistemului de alimentare cu apă. Acest aspect determină și uniformizarea distribuției de presiuni în rețeaua de conducte, cu efect asupra satisfacerii cerințelor consumatorilor. Totodată, pozițiile de amplasare ale rezervorului sunt impuse și de

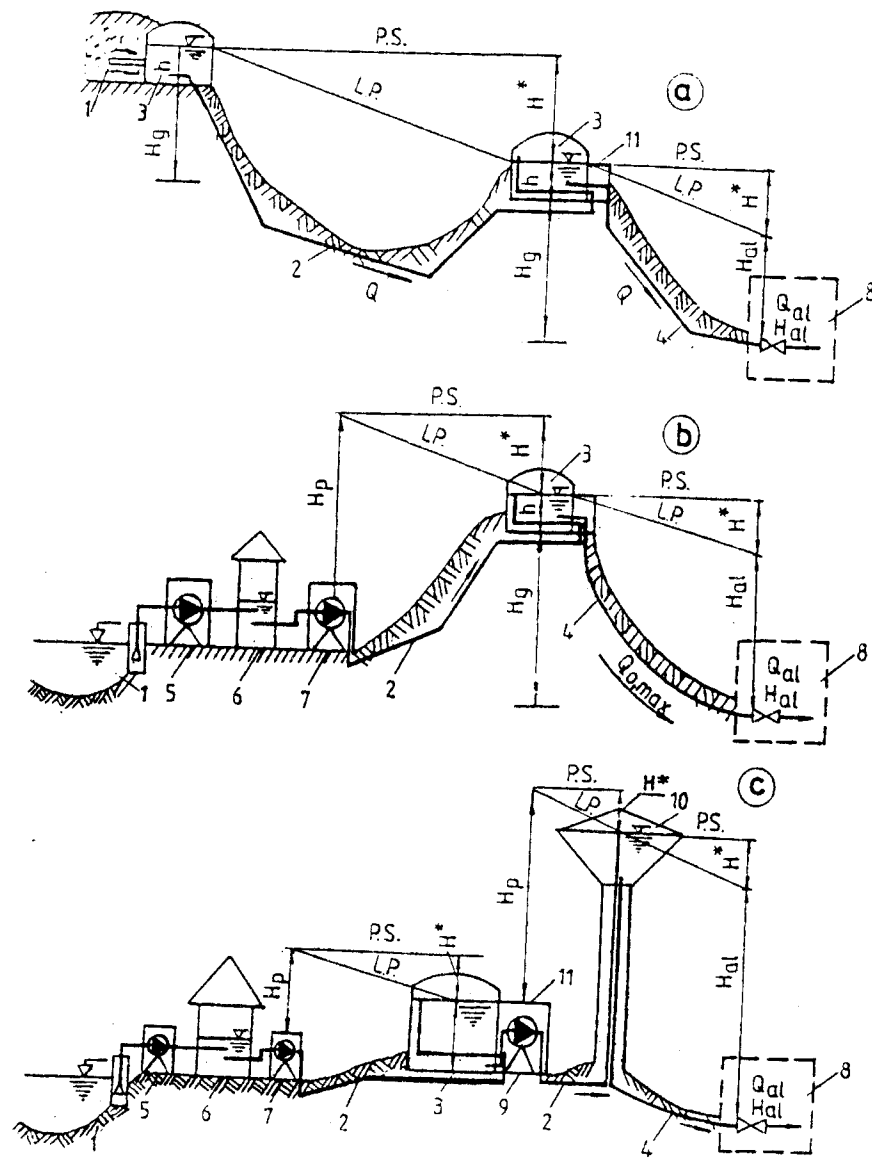


Fig. 1.2. Poziționarea rezervoarelor în funcție de formele reliefului:
 a - zone montane; b - zone de deal; c - zone de șes; 1 - sursa; 2 - aducțiune;
 3 - rezervor; 4 - conductă de alimentare; 5 - S.P. de bază; 6 - stație de tratare;
 7 - S. P. treapta a I-a; 8 - rețea de distribuție; 9 - S. P. treapta a II-a.

funcțiile care trebuie îndeplinite de acesta în cadrul sistemului de alimentare cu apă.

Astfel, rezervorul poate fi amplasat în următoarele poziții:

a - rezervor situat în amonte de zona de consum, respectiv între sursa de apă, sau stația de pompare și rețeaua de distribuție, numit în acest caz **rezervor de trecere**;

b - rezervor poziționat în aval de zona de consum, când rețeaua de distribuție se află între sursă și rezervor, fiind denumit în acest caz **contrarezervor**.

Dacă rezervorul este situat între sursa de apă și rețeaua de distribuție, apa preluată din sursă va circula în totalitate prin rezervoare. În scopul asigurării unor parametri optimi de exploatare și economici, schema de alimentare cu apă se dimensionează la debitul $Q_{s,zi,max}$, până la rezervor și la debitul $Q_{s,o,max}$, după rezervor.

Rezervoarele de acumulare pentru apă potabilă vor fi prevăzute cu o zonă de teren adiacentă, prin care se asigură protecția sanitară cu regim sever. Limitele acestei zone se stabilesc în conformitate cu reglementările în vigoare.

Distanțele de protecție recomandate, după poziția de amplasare față de anumite obiective, sunt următoarele [3]:

a - 20 m față de locuințe și drumuri;

b - 50 m față de clădiri și instalații industriale, de rețeaua de canale de apă menajeră, de closete;

c - 200 m față de cimitire, puțuri absorbante, depozite și platforme de gunoi și reziduri, stații de epurare și orice alte surse extrem de nocive care pot infecta apa;

c - 200 m față de cimitire, puțuri absorbante, depozite și platforme de gunoi și reziduri, stații de epurare și orice alte surse extrem de nocive care pot infecta apa.

Distanțele menționate pot fi majorate în situația prezentei în zonă a unor surse cu grad ridicat de poluare. Pentru astfel de situații trebuie întocmit un studiu, în care să se analizeze impactul surselor de poluare asupra amplasamentului și măsurile de protecție impuse de poziționarea rezervorului.

1.2. FUNCȚIILE REZERVORULUI ÎN CADRUL SISTEMULUI DE ALIMENTARE CU APĂ

Rezervoarele cu rol de acumulare a apei reci se prevăd pentru următoarele obiective:

a - instalații alimentate cu apă rece din rețele exterioare cu funcționare intermitentă;

b - rețele interioare sau exterioare a căror alimentare directă de la sursa de apă, cu volumele necesare pentru acoperirea nevoilor menajere, tehnologice, stingerea incendiilor etc. nu este posibilă din punct de vedere tehnic, sau nu este rațional din punct de vedere economic;

c - obiective speciale care trebuie alimentate cu apă tehnologică sau pentru combaterea incendiilor, chiar în situația unor avarii la sursa de apă.

În funcție de poziția sa, rezervorul trebuie să prezinte un volum determinat, care să asigure funcționarea curentă a rețelei de distribuție. Totodată, rezervorul trebuie să contribuie la creșterea siguranței în funcționare a sistemului de alimentare cu apă, astfel ca volumul înmagazinat să acopere diferența de debite la orice oră din an, respectiv:

$$(1.1.) \quad Q_{o,max} - Q_{zi,max} = \Delta Q,$$

în care $Q_{o,max}$ este debitul orar maxim, iar $Q_{zi,max}$ - debitul maxim zilnic. Volumul care asigură variația debitelor de apă, se numește **volum de compensare**.

De asemenea, rezervorul trebuie să asigure în orice moment volumele de apă necesare pentru stingerea incendiilor (**rezerva intangibilă, V_{inc}**), conform prescripțiilor PSI.

O buna funcționare a rețelei de distribuție este realizată și prin prevederea unui volum de apă, care să compenseze lipsa debitului în cazul apariției avariilor pe traseul sursă - rezervor (**volum de avarii V_a**).

Pentru situații funcționale speciale, rezervoarele trebuie să asigure o serie de volume de apă, denumite în general "**volume**

suplimentare" (V_{sup}), categorie în care pot intra și o parte din volumele menționate anterior.

Rezultă că o primă funcție a rezervorului este de a asigura un volum de apă determinat, diferențiat ca valoare și rol, după necesitățile consumatorului și modul de funcționare a sistemului.

A doua funcție a rezervoarelor este de a asigura presiunea de serviciu la consumatorii deserviți de rețeaua de distribuție. Din acest considerent, rezervorul trebuie să fie amplasat la o cotă dominantă hidraulic față de punctele deservite.

Cota rezervorului se alege, pe cât posibil, astfel ca în rețeaua de distribuție să se asigure presiunea la branșament (20 m.c.a. pentru clădiri cu patru niveluri și 4,5 m.c.a pentru fiecare nivel în plus). Totodată, cota se impune din condiția nedepășirii în rețea a presiunii maxime admisibile în sistemele de alimentare cu apă ($H = 60$ mca). Prin *cota rezervorului* - C_R se înțelege cota radierului în cuva rezervorului. Relația de calcul are forma:

$$(1.2) \quad C_R = Z_c + H_b + h_{r,R-c},$$

unde Z_c este cota geodezică la branșamentul consumatorului; H_b - presiunea necesară la branșamentul consumatorului; $h_{r,R-c}$ - pierderea de sarcină pe circuitul hidraulic rezervor - branșament.

Rezervoarele au rolul de a contribui la economia de energie generală în cadrul funcționării sistemului de alimentare cu apă. Aceasta se realizează prin diferențierea consumului de energie utilizat în pomparea apei, pe perioadele de minim și maxim din rețeaua energetică națională și locală.

După rolul volumului de apă înmagazinat, rezervoarele de acumulare se pot clasifica în modul următor:

a - rezervoare de compensare, care formează cea mai mare grupă de rezervoare aflate în exploatare;

b - rezervoare cu volume de apă numai pentru incendii;

c - rezervoare cu volume de apă pentru avarii;

d - rezervoare cu volume de apă pentru funcții auxiliare (spălarea filtrelor, realizarea de amestecuri, contact etc.);

e - rezervoare de rupere a presiunii (prevăzute pe aducțiunile lungi, situate pe terenuri în pantă) etc.

Rezervorul poate îndeplini o singură funcție (pct. a...e), sau poate avea mai multe funcții prin volumele de apă ce le înmagazinează (compensare + incendiu, compensare + avarii etc).

1.3. TIPURI ȘI FORME PENTRU REZERVOARE

Rezervoarele de acumulare sunt proiectate pentru un volum multiplu de apă, care să asigure, în general, următoarele roluri: compensare (rezerva de compensare, V_c), avarie (V_a), tehnologic (V_t), necesarul de apă pentru incendii (rezerva intangibilă V_{inc}) etc.

Variabilitatea volumelor de apă, ca mărime și destinație, determină modul de amplasare în teren al rezervorului. În acest caz rezervoarele pot fi de tipul [STAS 4165-81]:

a - rezervoare îngropate în teren;
b - rezervoare semiîngropate sau dispuse la nivelul terenului (neîngropate);

c - rezervoare supraterane (castele sau turnuri de apă).

Volumul rezervorului a fost tipizat din motive de uniformizare a proiectării și procesului de execuție. Volumele rezultate din calcule sunt rotunjite la valori de: 25; 50; 75; 100; 150; 200; 300; 400; 500; 750; 1.000; 1.500; 2.000; 5.000; 7.500; 10.000 m^3 . Pentru valori mai mari ale volumului soluțiile se particularizează de la caz la caz. Ansamblul funcțional este alcătuit din două construcții alăturate, respectiv rezervorul de înmagazinare al apei și camera vanelor.

Rezervoarele cu volume mai mici de 200 m^3 sunt prevăzute cu o singură cuvă. Rezervoarele cu volume mai mari de 200 m^3 pot prezenta mai multe cuve egale ca volum și rotunjite la valorile prezentate mai sus. În practică s-au realizat rezervoare cu volume de 30.000...50.000 m^3 și în mod curent se execută cu volume de 15.000...20.000 m^3 .

Castelele de apă sunt realizate în România cu volume de maximum 2.000 m^3 din considerente de execuție. Acestea sunt prevăzute cu o singură cuvă și asigură total sau parțial volumele

de apă necesare, la o presiune de 15 - 40 mca. Pe plan mondial s-au realizat castelele de apă cu volume de peste 5.000 m^3 .

Pentru a asigura îndeplinirea rolului său în cadrul sistemului de alimentare cu apă, rezervorul se va compune din următoarele elemente constructive și funcționale [1], [3]:

a - cuva propriu-zisă (una sau mai multe, în funcție de mărimea volumului considerat); cuva este elementul constructiv de înmagazinare a apei și este constituită din radier, pereții laterali, stâlp, planșeu și este prevăzută cu protecție termică, izolație hidrofugă și o serie de instalații funcționale (fig. 1.3);

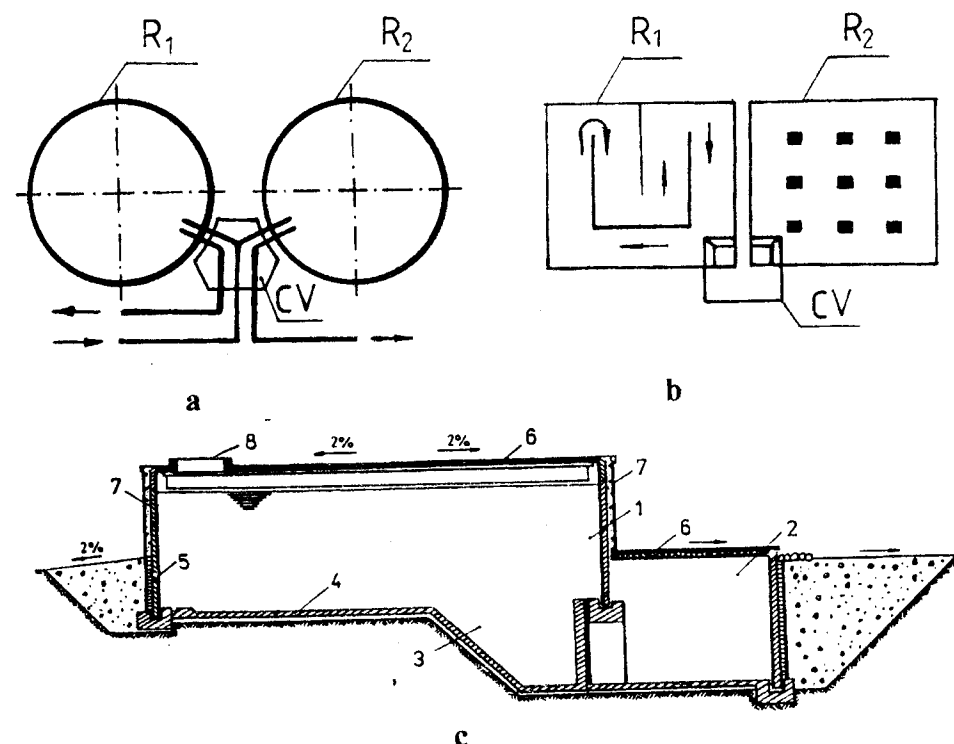


Fig.1.3. Elementele constructive la rezervoare: a – două rezervoare cuplate în paralel; b - secțiune transversală; 1 - cuva; 2- camera vanelor; 3 –bașă; 4 – radier; 5 – peretele cuvei; 6 – placă prefabricată; 7 – protecție termică; 8 – acces.

b - instalația hidraulică, amplasată în casa vanelor (anexă constructivă a cuvei) și care asigură funcționarea rezervorului în conlucrăre cu modul de exploatare al rețelei deservite;

c - instalații energetice de forță, iluminat etc;

d - instalații de ventilare;

e - instalații auxiliare (ridicat și manipulare, legare la pământ, drenare, măsurare a parametrilor, telecomunicații etc);

f - instalații de colectare a apelor pluviale și de drenare a apelor infiltrate în teren și exfiltrate din cuva rezervorului;

g - zonă de protecție sanitară (pentru rezervoarele de apă menajeră).

Cuva rezervorului trebuie să fie impermeabilă pentru a nu permite schimbul de apă cu exteriorul prin procesele de infiltrație și de a pierde apa din interior (proces de exfiltrație). Circulația apei în cuvă este dirijată de o serie de pereți șicană, amplasați pe radier și sprijiniți de stâlpi. Pentru primenirea permanentă a aerului este prevăzută o instalație de ventilație.

Rezervoarele sunt proiectate pentru a funcționa cu nivel liber. În acest scop, la partea superioară trebuie să existe un spațiu de cel puțin 30 cm ocupat cu aer aflat la presiunea atmosferică. Toate trecerile prin pereții cuvei se vor realiza în mod etanș, prin folosirea unor piese speciale de trecere.

Destinația rezervoarelor, precum și condițiile de relief, amplasament, climatice funcționale, și de rezistență au determinat realizarea unei game diverse de sisteme constructive. Tot odată s-au elaborat diverse metode de execuție de tip general și special. Din punct de vedere al rezistenței și al execuției, cele mai raționale forme de rezervoare sunt reprezentate de forma unor suprafețe de rotație (cu secțiunea circulară), atunci când se realizează cu pereți a căror deplasări nu sunt împiedecate de prezența fundului [2].

La rezervoarele cu forme cilindrice, acțiunea apei și după caz, de împingere a pământului, exercită asupra pereților presiuni uniforme, rotațional simetrice. Forțele de presiune provoacă în pereți eforturi axiale de întindere și de compresiune, care sunt preluate în mod favorabil în special de structurile din beton armat și beton precomprimat.

Forma cuvei rezervoarelor diferă după mărimea volumului înmagazinat, suprafața de teren disponibilă, materialul de execuție folosit și modul de realizare adoptat. În general, rezervoarele pot avea o formă spațială cilindrică (în special, pentru volume $V \leq 2500 \text{ m}^3$), paralelipipedică (pentru $V > 2500 \text{ m}^3$), tronconică și speciale (scoică, hiperbolice, lentilă etc) [STAS 4165-81].

Forma rezervorului poate fi aleasă și după alte criterii decât cele enumerate mai sus, situație în care rezultă forme apropiate de cele de egală rezistență. Din punct de vedere economic (inclusiv criteriile de rezistență), forma relativ optimă a rezervoarelor este de tip circular (cilindric).

Cuva rezervorului semiângropat în teren este acoperită cu un "acoperiș placă", sau cu un "acoperiș cupolă" dacă volumul înmagazinat are valoarea $V=25 \dots 200 (300) \text{ m}^3$ și cu un "planșeu ciupercă" pentru $V > 300 \text{ m}^3$. Acoperișul este dispus pe un sistem de susținere turnat odată cu radierul, sau realizat din elemente prefabricate.

Rezervoarele pentru acumularea apei reci au o înălțime utilă calculată pe considerente tehnico-economice, luând în considerare cerințele impuse de schema tehnologică a sistemului de alimentare cu apă și de dimensiunile elementelor de rezistență ale rezervorului. Înălțimea utilă se măsoară de la cota radierului până la cota superioară de la care începe funcționarea preaplinului. De la nivelul preplinului se prevede un spațiu de siguranță până la cota inferioară a elementelor acoperișului.

Înălțimea apei în rezervoare se adoptă cu valori de 3...4,5 m, în funcție de materialele folosite la execuția pereților. La rezervoarele de mare capacitate, înălțimea economică a apei poate ajunge la 5 - 6 m, iar la cele realizate din beton armat precomprimat se pot accepta înălțimi până la 12 m.

Din punct de vedere constructiv și funcțional, camera vanelor se realizează cu două niveluri. La nivelul inferior se dispune instalația hidraulică a rezervorului. La nivelul superior se montează utilajele de manevră a robineților, de ridicat și manipulat și se asigură spațiul de acces la compartimentele de înmagazinare a apei și la instalațiile auxiliare.

Instalația hidraulică este proiectată și realizată în funcție de modul de plecare a apei la consumator: gravitațional și prin pompare. În cazul în care distribuția nu se realizează gravitațional, camera vanelor va include stația de pompare. Pentru situații speciale de exploatare rezervoarele pot fi echipate cu instalații necesare alimentării cu apă a pompelor mobile de incendiu, conform normelor PSI în vigoare.

În general, camera vanelor, instalațiile hidraulice și cele conexe sunt "**partea adaptabilă**" a proiectului pentru rezervor.

La rezervoarele amplasate semiîngropat și la nivelul terenului se vor executa lucrări de izolare termică a pereților și acoperișului, precum și a conductelor expuse factorilor climatici.

1.4. MATERIALE DE EXECUȚIE

În funcție de evoluția lor istorică și încărcările la care au fost supuse, rezervoarele pentru înmagazinarea apei au fost executate din diverse materiale. Printre primele materiale folosite au fost, piatra și cărămida. Zidăria de piatră este utilizată la execuția rezervoarelor de mică capacitate și care sunt amplasate în zonele unde se găsește acest material de construcție.

Rezervoarele cu volume mari și de importanță economică și socială ridicată sunt executate din beton armat și beton precomprimat, în combinație cu elemente prefabricate [2], [9]. Betonul armat și betonul precomprimat, datorită rezistențelor mecanice ridicate, industrializării procesului tehnologic, adoptarea unor finisaje speciale impermeabile etc., rămân cele mai aplicabile și raționale materiale la execuția rezervoarelor. La rezervoarele descoperite (de tip bazin) s-a folosit și betonul simplu, dar soluția nu este viabilă în cazul zonelor seismice, macroporice etc. Betonul armat folosit la execuția pereților și stâlpilor are marca B 200...B 300, iar armătura este de tip OB și PC.

La realizarea rezervoarelor pentru fluide speciale se pot folosi combinații de diferite materiale (beton, oțel, cauciuc, fibre de sticlă etc.) alese pe criterii funcționale și de rezistență. Rezervorul poate

fi executat prin turnare pe loc sau prin asamblarea unor elemente prefabricate etc.

Ca materiale de execuție la realizarea rezervoarelor de capacitate mică se poate folosi tabla de oțel, masele plastice, elemente compozite etc.

La realizarea rezervoarelor descoperite cu forme și dimensiuni diverse, executate îngropat și semiângropat, se pot utiliza ca materiale de execuție și impermeabilizare foliile din mase plastice, lestate cu plăci din mortar, beton sau materiale compozite.

1.5. ELEMENTE PRIVIND EXPLOATAREA REZERVOARELOR DE ÎNMAGAZINARE A APEI

Funcționarea rezervoarelor de înmagazinare se realizează fără o supraveghere strictă și permanentă, având în vedere ipotezele de proiectare și modul de execuție. Monitorizarea parametrilor funcționali se realizează intermitent și poate fi inclusă într-un sistem automat împreună cu alte construcții și instalații conexe.

O preocupare principală în exploatare este dată de păstrarea calității apei în cuva rezervorului. Prezența substanțelor organice, în cazul unei tratări mai reduse a apei, circulația defectuoasă în cuvă a curentului de apă, fenomene de depunere etc., pot determina degradarea parametrilor de calitate ai apei. Acestea impun în mod periodic golirea cuvei de apă, cu curățirea, spălarea și dezinfectarea interiorului. De asemenea, cu această ocazie se remediază instalațiile rezervorului, în special cea hidraulică, care se dezinfectează și se revopsește.

O problemă deosebit de importantă în exploatarea rezervoarelor este constituită din menținerea sub control și la un nivel minim a exfiltrațiilor din cuvă. De asemenea, trebuie reduse la minim pierderile de apă prin îmbinările instalației hidraulice. Dacă rezervorul este amplasat pe un teren sensibil la înmuiere se vor executa lucrări de drenare a apelor de suprafață și subterane.

Lucrările de drenare vor fi verificate săptămânal și întreținute în mod curent. În cazul unor pierderi mari de apă se vor efectua probe de etanșeitate pe fiecare cuvă.

Terenul din zona de amplasament a rezervorului va fi verificat periodic în privința stabilității, mai ales în zonele sensibile la înmuiere și în cazul unor pierderi de apă din cuvă. De asemenea se vor efectua la intervale de timp măsurători de nivelment asupra rezervorului și zonei de amplasament în scopul prevenirii riscului de cedare a construcției și terenului de fundație.

Rezervoarele vor fi expertizate tehnic în privința construcției și a parametrilor funcționali conform normelor în vigoare.

BIBLIOGRAFIE

1. Mănescu Al., Sandu M., Ianculescu O. - *Alimentări cu apă*. Editura Didactică și Pedagogică, București, 1994.
2. Mihul A. - *Construcții din beton armat*. Editura Didactică și Pedagogică, București, 1969.
3. Păslărașu I., Teodorescu M., Rotaru C. - *Alimentări cu apă*. Editura Tehnică, București, 1981.
4. Prișcu R. - *Construcții hidrotehnice*. vol. I și II, Editura Didactică și Pedagogică, București, 1974.
5. Rojanschi V. - *Alimentarea cu apă în zootehnie*. Editura Ceres, București, 1986.
6. Trofin P. - *Alimentări cu apă*. Editura Didactică și Pedagogică, București, 1981.
7. STAS 10898-85. *Alimentări cu apă și canalizări. Terminologie*.
8. STAS 1343/0-89. *Alimentări-cu apă. Determinarea cantităților de apă. prescripții generale*.
9. STAS 4165/83. *Alimentări cu apă. Rezervoare din beton armat și beton precomprimat. Prescripții generale*.
10. STAS 1478-90. *Instalații sanitare. Alimentarea cu apă la construcții civile și industriale. Prescripții fundamentale de proiectare*.
11. x x x - *Manualul inginerului hidrotehnician*. vol.II, Editura Tehnică, București, 1969.

CAPITOLUL 2

PROIECTAREA CAPACITĂȚII REZERVOARELOR

2.1. STRUCTURA CAPACITĂȚII REZERVOARELOR

Rezervorul de acumulare se dimensionează pentru un volum care să asigure funcționarea curentă a consumatorilor deserviți. Prin volumul lor disponibil, rezervoarele pot îndeplini funcții complexe (compensare + incendiu + avarii, etc), sau particulare, după caz (incendiu, rezervă, stocare, amestec etc.).

În cazul unui rezervor cu funcție complexă, conform STAS 4165 - 88, volumul proiectat rezultă ca valoarea cea mai mare dată de următoarele relații de calcul:

$$(2.1.a) \quad V_R = V_c + V_{inc} + V_{sup} + V_{jus}, \quad (m^3),$$

$$(2.2.a) \quad \text{sau} \quad V_R = V_c + V_{av} + V_{sup} + V_{jus}, \quad (m^3),$$

unde V_c este volumul de compensare ce trebuie acumulat pentru a se asigura funcționarea rațională a sistemului; V_{inc} - volumul intangibil de apă pentru incendiu; V_{av} - volumul de avarie; V_{sup} - volum suplimentar; V_{jus} - volume de apă justificate economic.

În conformitate cu STAS 1478-90, volumul rezervoarelor de înmagazinare se determină din analiza comparativă a relațiilor:

$$(2.1.b) \quad V_R = V_{den} + V_{inc} + V_{comp} \quad (m^3)$$

$$(2.2.b) \quad \text{sau} \quad V_R = V_{den} + V_{ac} + V_{comp} \quad (m^3)$$

unde V_{den} este volumul necesar ca urmare a denivelării nivelului apei determinate de aspirația acestuia de către sorb (volumul se ia în considerare numai la rezervoarele având peste 2000 m³); V_{ac} - volumul rezervei pentru consum menajer sau scopuri tehnologice, care să asigure funcționarea în caz de avarie la sursă.

În general, capacitatea rezervoarelor este determinată prin însumarea volumului de compensare, volumului intangibil de apă pentru combaterea incendiilor sau volumul de avarie, luată cu valoarea sa totală sau parțială conform rezultatelor calculelor economice efectuate.

Volumul rezervorului de înmagazinare trebuie să fie cel puțin egal cu:

$$(2.3.a) \quad V_R \geq 0,5 Q_{zi,max}$$

șicel mult egal cu:

$$(2.3.b) \quad V_R \leq T_{max} \cdot Q_{zi,max},$$

în care T_{max} este valoarea maximă a timpului de trecere a apei prin rezervor. Mărimea timpului este dată de normele sanitare, astfel încât calitatea apei să nu se deterioreze în cursul înmagazinării. Pentru rezervoarele îngropate se admite, de regulă, o valoare pentru T_{max} de circa șase zile, iar pentru cele aeriene sau neprotejate termic, maxim două zile [3].

Volumul rezervorului rezultat din calcul se rotunjește la o valoare standardizată, specifică pentru capacitatea și tipul constructiv și funcțional de rezervor proiectat [2].

2.2. DETERMINAREA DEBITELOR DE CALCUL

2.2.1. Metodica de calcul

Determinarea cantităților necesare de apă, în funcție de caracteristicile consumatorilor (centre populate, unități industriale, unități agrozootehnice, etc), se calculează în România conform STAS 1343, reactualizat în anii 1986-1994. Calculul volumului de apă pentru incendiu se realizează conform STAS 1478 - 90.

Debitele caracteristice luate în considerare la calculele de dimensionare sunt următoarele:

- debitul zilnic mediu, $Q_{n,zi,med}$, în regim normal de exploatare

$$(2.4.a) \quad Q_{n, zi, med} = \frac{1}{1000} \sum_{i=1}^n N_i \cdot q_i, \quad (m^3/zi),$$

sau

$$(2.4.b) \quad Q_{n, zi, med} = \frac{1}{1000} \sum_{i=1}^n N_i \cdot q_i + q_{s,i} + q_a, \quad (m^3/zi),$$

unde $q_i = q_{g,i} + p_{i,i}$

- debitul zilnic maxim, $Q_{n,zi,max}$, în regim normal de exploatare

$$(2.5.a) \quad Q_{n, zi, max} = \frac{1}{1000} \sum_{i=1}^n N_i \cdot q_i \cdot K_{zi,i} \quad (m^3/zi),$$

sau

$$(2.5.b) \quad Q_{n, zi, max} = \frac{1}{1000} \sum_{i=1}^n N_i \cdot q_i \cdot K_{zi,i} + q_{s,max} + q_{a,max}, \quad (m^3/zi);$$

- debitul zilnic maxim, $Q_{n,zi,max,res}$, în regim restrictiv de exploatare

$$(2.5.c) \quad Q_{n,zi,max,res} = \frac{1}{1000} \sum_{i=1}^n N_i \cdot q'_i \cdot K_{zi,i} + q'_{s,i} + Q_{r,i}, \quad (m^3/zi);$$

- debitul orar maxim, $Q_{n,o,max}$,

$$(2.6) \quad Q_{n, o, max} = \frac{1}{1000} \cdot \frac{1}{24} \cdot \sum_{i=1}^n N_i \cdot q_i \cdot K_{zi,i} \cdot K_{o,i} \quad (m^3/h),$$

unde N_i este numărul de consumatori de apă; n_i sau q_i - norma specifică de consum pentru o anumită calitate de apă; $q_{g,i}$ - necesarul de apă pentru nevoi gospodărești; $q_{p,i}$ - necesarul de apă pentru nevoi publice; q_s - necesarul de apă pentru stropit-spălat și spații verzi; q_a - necesarul de apă pentru acoperirea altor consumuri specifice zonei alimentate (industrie, agroindustrial, etc); K_{zi} - coeficient de variație zilnică; K_o - coeficient de variație orară (tabel 2.2); $Q_{r,i}$ - debitul pentru refacerea rezervei de incendiu.

Valorile coeficientului de variație zilnică, K_{zi} , sunt prezentate în tabelul 2.1.

Coeficientul de variație zilnică, K_{zi} , reprezintă raportul între debitele $Q_{zi,max}$ și $Q_{zi,med}$ și depinde de nivelul și modul de folosire a apei, clima localității, mărimea incintei, etc (tabel 2.1).

Norma de necesar specific de apă, q_i sau n_i , reprezintă raportul dintre volumul zilnic mediu de apă necesar în cadrul

incintei raportat la numărul consumatorilor de bază (tabel 2.1, conform SR 1343/1-95).

Tabel 2.1. Debite zilnice medii specifice, q_{sp} , în $dm^3/om, zi$, și coeficienții de variație zilnică K_{zi} (SR 1343/1-95).

Nr rt	Zone ale localității în funcție de gradul de dotare a clădirilor cu instalații de apă rece și caldă	Nevoi gospod q_{gi}	Nevoi publice q_{pi}	Total $q_{spi}=q_{gi}+q_{pi}$	K_{zi}
1.	Zone în care apa se distribuie prin cișmele amplasate pe străzi	40	25	65	$\frac{1,30}{1,45}$
2.	Zone în care apa se distribuie prin cișmele amplasate în curți	80	30	110	$\frac{1,20}{1,35}$
3.	Zone cu gospodării având instalații interioare de apă rece și canalizare	140	30	170	$\frac{1,20}{1,35}$
4	Zone cu gospodării având instalații interioare de apă și canalizare, cu preparare locală a apei calde	210	85	295	$\frac{1,15}{1,30}$
4.	Zone cu clădiri având instalații interioare de apă și canalizare, cu prepararea centralizată a apei calde (inclusiv cele cu clădiri racordate la termoficare)	280	100	380	$\frac{1,10}{1,25}$

Coeficientul de variație orară, K_o , reprezintă raportul dintre debitul orar maxim, $Q_{o,max}$, respectiv mediu, $Q_{o,med}$, iar valorile date de SR 1343/1-95 sunt prezentate în tabelul 2.2.

Numărul consumatorilor se determină în funcție de specificul acestora (unități industriale, agricole, zootehnice) și perspectiva de dezvoltare pe o perioadă de timp determinată. În cazul consumului menajer, numărul locuitorilor se poate estima, dacă nu se cunosc datele privind sporul populației, prin relația următoare:

$$(2.7) \quad N_t = N (1 + 0,01 p)^t$$

unde N este numărul de locuitori în situația existentă, p - procentul anual de creștere al populației (determinat pe cale statistică), t - numărul de ani pentru care se efectuează calculul.

Tabel 2.2. Valorile coeficientului de variație orară K_o în funcție de numărul total N de locuitori ai centrului populat (SR 1343-95)

N	K_o	N	K_o
≤ 500	2,80	15.000	1,35
1.000	2,20	25.000	1,30
1.500	2,00	50.000	1,25
3.000	1,75	100.000	1,20
7.000	1.50	≥ 200.000	1,20

Debitele determinate cu relațiile (2.4), (2.5) și (2.5) reprezintă valori nete de calcul și sunt notate Q_n . Pentru a ține cont de pierderile de apă din sistem și de nevoile tehnologice proprii ale sistemului, se corectează debitele nete prin folosirea unor coeficienți cu valoare supraunitară. Pentru considerarea pierderilor de apă tehnice din sistem, coeficientul de corecție are valorile $K_p = 1,10 \div 1,20$. Coeficientul pentru întreținerea sistemului (nevoi tehnologice) prezintă valori în funcție de tipul sursei și modul de tratare a apei. Valorile folosite curent sunt:

- $K_s = 1,02$, pentru surse subterane de apă și fără proces de tratare;

- $K_s = 1,07$, pentru surse de suprafață și subterane, cu tratarea apei și în cazul unor debite instalate cu valori peste $1,05 m^3/s$;

- $K_s = 1,10$, pentru surse de suprafață și subterane, cu tratarea apei și în cazul unor debite instalate cu valori sub $0,50 m^3/s$.

Rezultă că debitul brut preluat din sursă se va calcula cu relația:

$$(2.8) \quad Q_s = K_p \cdot K_s \cdot Q_n$$

unde Q_n poate lua valoarea $Q_{n,zi,med}$, $Q_{n,zi,max}$, $Q_{n,o,max}$. Rezultatele obținute vor fi notate: $Q_{s,zi,med}$, $Q_{s,zi,max}$ și $Q_{s,o,max}$.

De menționat că, relațiile (2.4) ÷ (2.6) și (2.8) cuprind toate nevoile de apă, cu excepția celor pentru combaterea incendiului.

2.2.2. Exemplul de calcul nr. 2.1.

Determinarea debitelor de calcul

Date inițiale și restricții:

Să se determine debitele de calcul pentru alimentarea cu apă a unei localități, care în stadiul actual are 30.000 locuitori. Conform schiței de sistematizare, perioada de dezvoltare în perspectivă a localității este de 20 de ani. Procentul mediu de creștere al populației are valoarea $p = 1,2$. Clădirile dispun de instalații interioare de alimentare cu apă caldă și rece, iar apa caldă este preparată în instalații centrale. De asemenea, clădirile sunt racordate la rețeaua de canalizare.

Mod de calcul.

Elementele de calcul se determină în următoarea ordine:

- numărul locuitorilor la sfârșitul perioadei de perspectivă, conform relației 2.7 și datelor inițiale de calcul ($N = 30.000$ loc $p = 1,2$, $t = 20$ ani), va fi:

$$N_t = N (1 + 0,01 p)^t$$

$$N_{20} = 30.000 (1 + 0,01 \cdot 1,2)^{20} \Rightarrow N_{20} = 38.083 \text{ loc;}$$

- consumul zilnic mediu specific, n_{sp} , pentru zona a 4-a, conform tabelului 2.1, rezultă cu valoarea:

$$n_i = n_{sp} \text{ unde } n_{sp} = n_g + n_p,$$

$$n_{sp} = 280 + 100 = 380 \text{ dm}^3/\text{om, zi};$$

- coeficientul de variație zilnică pentru zona a 4-a, conform tabelului 2.1 este $K_{zi} = 1,10 \dots 1,25$; în calcule se adoptă valoarea $K_{zi} = 1,10$;

- coeficientul de variație orară, pentru o localitate cu 38.083 loc, conform tabelului 2.2, rezultă prin interpolare cu valoarea $K_o = 1,276$;

- debitul zilnic maxim, conform relației (2.5), rezultă cu valoarea:

$$Q_{n, zi, \max} = \frac{1}{1000} N_i \cdot n_i \cdot K_{zi}, \text{ unde } N_i = N_{20}$$

$$Q_{n, zi, \max} = \frac{1}{1000} \cdot 38.083 \cdot 380 \cdot 1,10$$

$$Q_{n, zi, \max} = 15.918,7 \text{ m}^3/\text{zi};$$

Observație: s-a renunțat la semnul Σ , deoarece debitul zilnic mediu specific este același în toate zonele de calcul ale localității;

- valoarea debitului orar maxim, conform relației (2.6), rezultă:

$$Q_{n, v, \max} = \frac{1}{1000} \cdot \frac{1}{24} \cdot N_i \cdot n_i \cdot K_{zi} \cdot K_o,$$

$$Q_{n, o, \max} = \frac{1}{1000} \cdot \frac{1}{24} \cdot 38.083 \cdot 380 \cdot 1,10 \cdot 1,276,$$

$$Q_{n, o, \max} = 846,3 \text{ m}^3/\text{h};$$

- debitul maxim al cerinței de apă, conform relației (2.8), în care s-a considerat $K_p = 1,10$ și $K_s = 1,10$, rezultă cu valoarea

$$Q_{s, zi, \max} = K_p \cdot K_s \cdot Q_{n, zi, \max},$$

$$Q_{s, zi, \max} = 1,10 \cdot 1,10 \cdot 15.918,7 \Rightarrow Q_{s, zi, \max} = 19.261,6 \text{ m}^3/\text{zi},$$

$$\text{sau } Q_{s, zi, \max} \approx 19.262 \text{ m}^3/\text{zi}.$$

Recapitulare:

- debitul zilnic maxim , $Q_{n, zi, \max} = 15.918,7 \text{ m}^3/\text{zi};$

- debitul orar maxim, $Q_{n, o, \max} = 846,3 \text{ m}^3/\text{h};$

- debitul maxim al cerinței de apă $Q_{s, zi, \max} = 19.262 \text{ m}^3/\text{zi}.$

2.3. DEBITELE DE DIMENSIONARE PENTRU SCHEMA DE ALIMENTARE CU APĂ

Debitele caracteristice pentru calculele de dimensionare sunt $Q_{zi, \text{med}}$, $Q_{n, zi, \max}$ și $Q_{n, o, \max}$, dintre care, valoarea cea mai mare o prezintă debitul orar maxim. Dimensionarea construcțiilor și instalațiilor, din care sistemul de alimentare cu apă este alcătuit, trebuie realizată astfel încât să se asigure, în fiecare secțiune funcțională, debitul necesar conform cerințelor de proiectare.

Din analiza posibilităților de utilizare a debitelor menționate anterior, rezultă că, dimensionarea componentelor schemei de alimentare situate între captare și stația de tratare inclusiv (sau rezervor), se realizează prin folosirea debitului zilnic maxim, inclusiv debitul de refacere a rezervei de incendiu. Pentru acest tronson al sistemului de alimentare cu apă, debitul de dimensionare rezultă dintre valorile maxime obținute cu relațiile:

$$(2.9) \quad Q_1 = Q_{s, zi, max} = K_p \cdot K_s \cdot \sum_{i=1}^n \frac{N_i \cdot n_i}{1000} \cdot K_{zi,i} \quad (m^3/zi),$$

sau

$$(2.10) \quad Q_1 = Q'_{s, zi, max} + Q_{r,i} \quad (m^3/zi),$$

unde $Q'_{s, zi, max}$ este debitul zilnic maxim cu restricții; $Q_{r,i}$ - debitul de refacere al rezervei de incendiu.

Pentru tronsonul din schemă situat în aval de rezervorul de apă tratată, debitele de calcul sunt calculate cu următoarele expresii:

a - debitul de dimensionare,

$$(2.11) \quad Q_2^d = Q_{s,o,max} + Q_{ii} = K_p K_s \sum_{i=1}^n \frac{N_i n_i}{1000} K_{zi,i} K_{0,i} \frac{1}{24} + 3,6 \sum_{i=1}^n Q_{ii}$$

în (m^3/h) , unde Q_{ii} este debitul de incendiu la hidranții interiori și în condiția asigurării presiunii acestora;

b - debitul de verificare, care se determină în ipoteza de incendiu la debitul cu valoarea cea mai ridicată:

(2.12)

$$Q_2^{v1} = a Q_{s,o,max} + \sum_{i=1}^n Q_{ie} = a K_p \cdot K_s \cdot \sum_{i=1}^n \frac{N_i \cdot n_i}{1000} K_{zi,i} \cdot K_{0,i} \cdot \frac{1}{24} + 3,6 \sum_{i=1}^n Q_{ie},$$

în (m^3/h) , sau

$$(2.13) \quad Q_2^{v2} = Q_{s,o,max} + 3,6 \sum_{i=1}^{n-1} Q_{ie} + 3,6 Q_{ii} \quad (m^3/h),$$

în funcție de modul de acoperire a necesarului de presiune la hidranții exteriori de debit Q_{ie} și la hidranții interiori de debit Q_{ii} .

2.4. DETERMINAREA VOLUMULUI DE COMPENSARE

2.4.1. Considerații teoretice și metodica de calcul

Volumul de compensare este reprezentat de volumul de apă înmagazinat în rezervor și care este dat de diferența de debit $\Delta Q = Q_{o,max} - Q_{zi,max}$ la orice oră din an. Astfel, se asigură într-un mod convenabil funcționarea curentă a rețelei de distribuție și creșterea siguranței în exploatare a sistemului de alimentare cu apă.

Volumul de compensare, V_c , se calculează prin metode grafice sau analitice, astfel încât volumul de apă să fie reținut în rezervor în perioadele în care nu este solicitat de utilizator (perioadele de consum minim) și să fie redistribuit în perioadele când este solicitat, respectiv în perioadele de consum maxim. Pentru ambele metode de calcul trebuie cunoscute legea de variație a volumului consumat (ieșit din rezervor), precum și a volumului de alimentare a rezervorului. Pentru generalizarea problemei, ambele volume (intrate și ieșite din rezervor) se exprimă sub formă procentuală.

Variația volumului consumat de apă menajeră se determină în cazul localităților prin asimilarea datelor, cunoscute din măsurători experimentale efectuate asupra unor sisteme aflate deja în exploatare [4]. STAS 4165-88 precizează în mod aproximativ valorile volumului de compensare în funcție de numărul de locuitori ai localității (tabel 2.3). Volumul real de apă menajeră consumată se poate afla numai după execuția sistemului de alimentare cu apă și exploatarea lui normală pe o durată de timp determinată.

Alimentarea sistemului se dimensionează la $Q_{zi,max}$, iar conductele de distribuție în cadrul sistemului la $Q_{o,max}$.

Metoda grafică de calcul constă în reprezentarea în planul QtV (fig. 2.1, unde t este timpul unei zile exprimate în ore, iar V volumul alimentat sau consumat în procente din $Q_{zi,max}$) a variației în timp a valorilor cumulate prin pompare (intrări în rezervor), respectiv de consum (ieșiri din rezervor).

Tabel 2.3. Volumul de compensare % din $Q_{zi, \max}$ (m^3/zi) STAS 4165-88

Nr.locuitori (mii)	$N \leq 5$	$5 < N \leq 10$	$10 < N \leq 20$
Coeficient (%)	50	40	35
Nr.locuitori (mii)	$20 < N \leq 50$	$50 < N \leq 100$	$100 < N \leq 300$
Coeficient (%)	30	25	20

Dacă debitul de alimentare este uniform într-o funcționare de 24 ore/zi, atunci într-o oră va intra în rezervor cantitatea:

$$(2.14) \quad Q_u = \frac{100\% \cdot Q_{zi, \max}}{24h} = 4,16\% Q_{zi, \max} \quad (m^3/h),$$

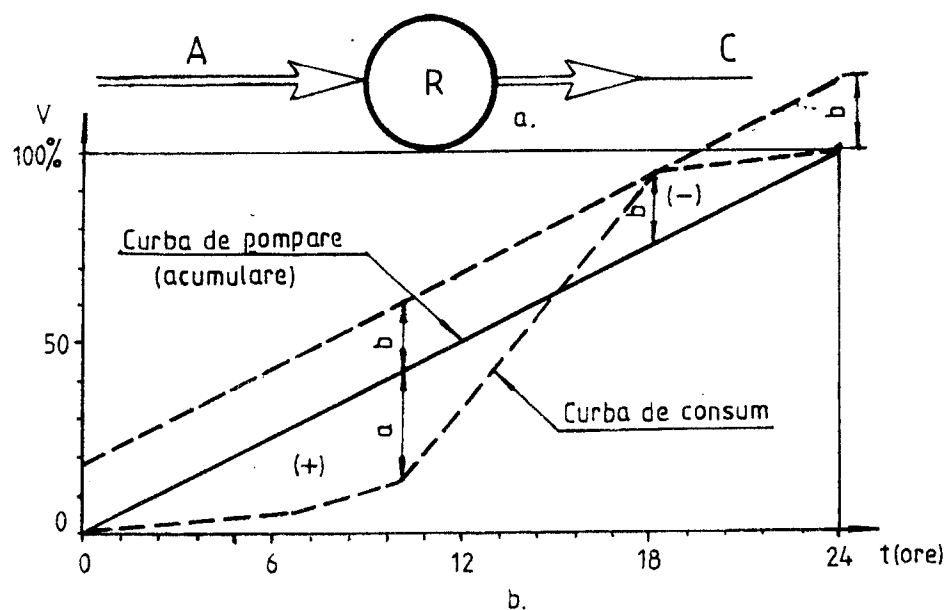


Fig. 2.1. Calculul grafic al volumului de compensare:
a - schema sinoptică a rezervorului; b - graficul de calcul pentru o alimentare constantă și un consum variabil pe durata unei zile.

care prin cumulare în timp determină un volum reprezentat în fig. 2.2. prin dreapta A. De menționat că, alimentarea prin pompare a rezervorului se poate realiza pe parcursul a 24 ore/zi, sau pe un

interval de timp mai redus (ex. durata unui schimb sau a două schimburi, respectiv 8 sau 16 ore, situație în care numitorul ec. 2.14 se modifică).

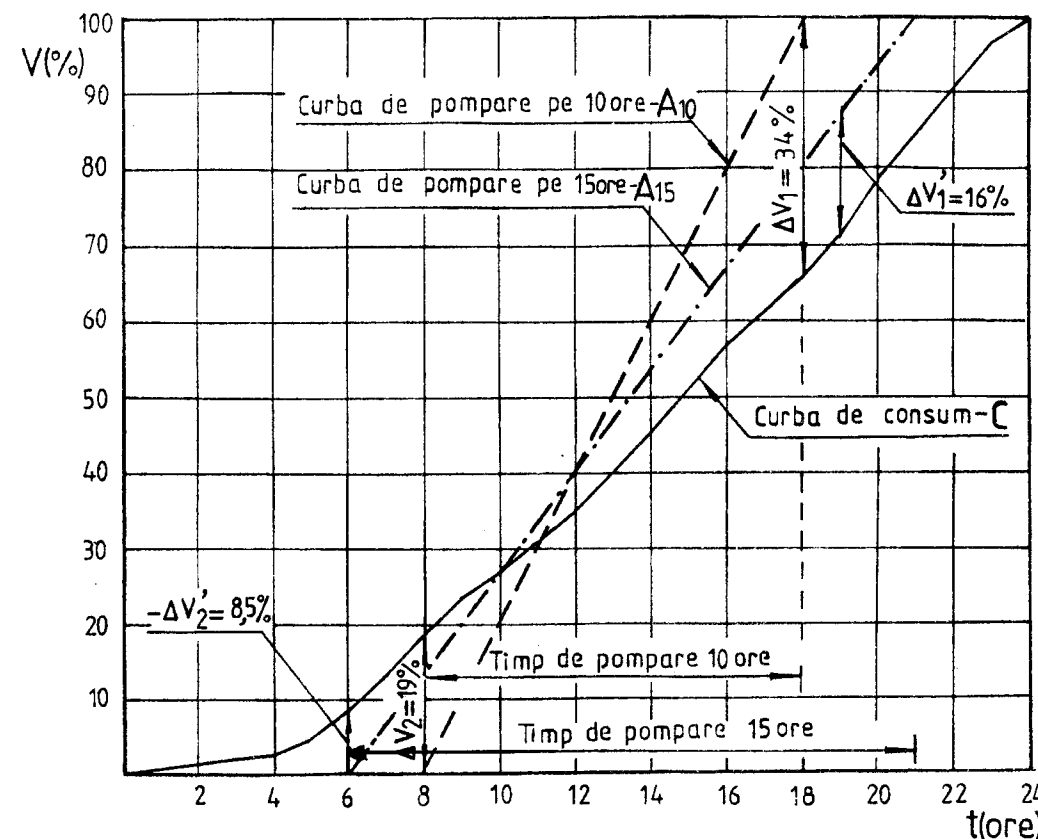


Fig.2.2. Calculul grafic al volumului de compensare.

Pe același grafic se va reprezenta curba consumului C, conform datelor cunoscute, sau măsurate. Diferența pe ordonată a celor două curbe scoate în evidență valorile procentuale maxime pozitive (volumul "a"), sau diferențele de volume $+\Delta V$, respectiv valorile procentuale maxime negative (volumul "b"), sau $-\Delta V$.

Prin cumularea valorilor exprimate în modul se poate determina volumul de compensare, respectiv:

$$(2.15.a) \quad V_c = \frac{|a| + |b|}{100} \cdot Q_{zi, \max} \quad (m^3),$$

sau

$$(2.15.b) \quad V_c = |+\Delta V| + |-\Delta V| \quad (m^3),$$

dacă sunt folosite volume în locul valorilor procentuale.

Determinarea analitică a volumului de compensare se realizează centralizat într-un tabel de calcul, particularizat după modul de alimentare și ieșire a apei din rezervor (tabel 2.4).

Modul de calcul și completare a tabelului este următorul:

- în prima coloană se trec orele din cadrul unei zile;
- în coloana a doua se trece necesarul din volumul maxim zilnic în valori procentuale;
- în a treia coloană se trec valorile procentuale cumulate ale debitului de consum;
- în coloanele 4 și 5 se trec valorile debitelor de consum, respectiv volumele de consum cumulate pe parcursul orelor din cadrul unei zile;
- în coloana a 6-a se trece volumul orar pompat (intrat în rezervor) în funcție de ipoteza adoptată (pompare pe un schimb, două schimburi, sau pe 24 h etc);
- în coloana a 7-a se trec valorile cumulate ale volumelor pompate în rezervor;
- în coloana a 8-a se calculează diferențele dintre consum și alimentare cu atribuirea semnelor respective.

Din calcul rezultă două maxime: un maxim pozitiv al intrărilor ($a = +\Delta V$) și un maxim negativ al ieșirilor ($b = -\Delta V$). Prin cumularea în modul a celor două maxime (ec.2.15.b) se obține valoarea volumului de compensare.

Calculul analitic se poate realiza și prin folosirea numai a valorilor procentuale. În această situație, numărul rubricilor din tabel se micșorează.

Tabel 2.4. Calculul analitic al volumului de compensare

Interval de timp ore	Repartiția zilnică a debitului de consum		Consum		Alimentare		Diferențe $\Delta V = \Delta V_z - \Delta V_1 =$ $= \sum \frac{Q_a}{t} - \sum \frac{Q_c}{t}$ mc
	parțial % /oră	cumulat %	Debit Q_c mc/h	Volum cumulat $V_1 = \sum Q_c t$ mc	Debit Q_a mc/h	Volum cumulat $V_z = \sum Q_a t$ Mc	
1	2	3	4	5		7	8
0 - 1							
1 - 2							
,							
,							$+\Delta V_{\max}$
,							
$t_i - t_{i+1}$							
,							
,							
,							$-\Delta V_{\max}$
22 - 23							
23 - 24							
Total	-	100,00	$Q_{c, \max}$	V_1	Q_a	V_z	$V_c = +\Delta V_{\max} + -\Delta V_{\max} $

Tot odată, calculul analitic prezintă o eroare mult micșorată față de metoda grafică, fapt ce îl determină să fie folosit în etapa de proiectare a capacității rezervoarelor de acumulare.

Numărul de ore de funcționare a stației de pompare influențează gradul de mărime a volumului rezervorului, implicit al investiției, precum și consumul energetic pentru pomparea apei.

Un rezervor cu volum mai mic va determina un consum energetic pentru pomparea apei mai mare. Un rezervor cu o capacitate de înmagazinare mai mare implică o investiție ridicată în construcție și o micșorare a cheltuielilor pentru energia necesară pomparei apei.

2.4.2. Exemple de calcul

2.4.2.1. Exemplul nr.2.2. Metoda aproximativă de calcul.

Date inițiale și restricții. Se cere determinarea volumului de compensare al rezervorului de acumulare din cadrul sistemului de alimentare cu apă al unei localități, care în perspectivă va avea circa 38.000 locuitori.

Mod de calcul. Conform STAS 4165-88, pentru localități cu $20000 < N \leq 50000$ locuitori, procentul pentru volumul de compensare alocat din debitul zilnic maxim este de 30 %, (tabel 2.3).

Rezultă în acest caz valoarea volumului de compensare:

$$V_c = 0,30 \cdot Q_{s,zi,max}$$

$$V_c = 0,30 \cdot 19.262 \Rightarrow V_c = 5.778,6 \text{ m}^3$$

2.4.2.2. Exemplul nr. 2 3. Metoda analitică de calcul.

Date inițiale și restricții. Se cere determinarea volumului de compensare pentru un rezervor de acumulare, cunoscând pe baza măsurărilor efectuate valorile procentuale ale consumului orar (tabel 2.5, coloana 2, STAS 1343 - 86). Alimentarea rezervorului se realizează pe întreg intervalul celor 24 ore cu un debit constant de $800 \text{ m}^3/\text{h}$. Debitul zilnic maxim al cerinței de apă este de $19.262 \text{ m}^3/\text{zi}$.

Mod de calcul:

Calculul se efectuează tabelar, conform celor prezentate la cap. 2.4. Datele de calcul și rezultatele sunt prezentate în tabelul 2.5. Din analiza datelor calculate și prezentate în coloana a 8-a se remarcă următoarele:

- diferența maximă pozitivă, $\Delta V = +3259,04 \text{ m}^3$,

- diferența maximă negativă, $\Delta V = -284,14 \text{ m}^3$,

de unde rezultă valoarea volumului de compensare,

$$V_c = |+\Delta V| + |-\Delta V|$$

$$V_c = |3259,04| + |-284,04| \Rightarrow V_c = 3543,18 \text{ m}^3,$$

sau prin rotunjire $V_c = 3543 \text{ m}^3$.

Tabel 2.5. Exemplu de calcul pentru volumul de compensare

Ora	Repartiția zilnică Q_c		Consum		Alimentare		Diferențe $\Sigma Q_a - \Sigma Q_c$ (mc)
	Parțial %/oră	cumulat (%)	Q_c (mc/h)	ΣQ_c (mc)	Q_a (mc/h)	ΣQ_a (mc)	
1	2	3	4	5	6	7	8
0-1	1,0	1,0	192,62	192,62	800	800	607,38
1-2	0,5	1,5	96,31	288,93	800	1600	1311,07
2-3	0,5	2,0	96,31	385,24	800	2400	2014,76
3-4	0,5	2,5	96,31	481,55	800	3200	2718,45
4-5	2,0	4,5	385,24	866,79	800	4000	3133,21
5-6	3,5	8,0	674,17	1540,96	800	4800	3259,04
6-7	5,0	13,0	963,10	2504,06	800	5600	3095,94
7-8	5,5	18,5	1059,41	3563,47	800	6400	2836,53
8-9	5,0	23,5	963,10	4526,57	800	7200	2943,43
9-10	4,0	27,5	770,48	5297,05	800	8000	2702,95
10-11	3,5	31,0	674,17	5971,22	800	8800	2828,78
11-12	4,0	35,0	770,48	6741,70	800	9600	2858,3
12-13	5,0	40,0	963,10	7704,80	800	10.400	2695,20
13-14	5,5	45,5	1059,41	8764,21	800	11.200	2435,79
14-15	6,0	51,5	1155,72	9919,93	800	12.000	2080,07
15-16	5,5	57,0	1059,41	10.979,34	800	12.800	1820,66
16-17	5,0	62,0	963,10	11.942,44	800	13.600	1657,56
17-18	4,0	66,0	770,48	12.712,92	800	14.400	1687,08
18-19	5,5	71,5	1059,41	14.157,57	800	15.200	1427,67
19-20	7,0	78,5	1348,34	15.505,91	800	16.000	879,33
20-21	7,0	85,5	1348,34	16.854,25	800	16.800	330,99
21-22	6,5	92,0	1252,03	18.106,28	800	17.600	- 121,04
22-23	5,0	97,0	963,10	19.069,38	800	18.400	-284,14
23-24	3,0	100,00	577,86	19.262	800	19.200	-62

2.4.2.3. Exemplul nr. 2 4. Metoda grafică de calcul.

Date inițiale și restricții. Se cere valoarea volumului de compensare pentru rezervorul de acumulare în situația cunoașterii variației procentuale a debitului de consum, conform datelor de

calcul prezentate în standardele în vigoare (SR 1343 – 1995). Alimentarea rezervorului se realizează prin pompare pe parcursul a 10 ore din zi, în intervalul orar 8 - 18. Valoarea debitului zilnic maxim este de 19.262 m³/zi.

Mod de calcul.

Succesiunea operațiilor este următoarea:

- la o scară convenabilă se reprezintă sistemul de axe Ovt, cu t = 0...24 h și V = 0...100 % (fig.2.2);
- se reprezintă valorile procentuale ale curbei volumului cumulat de apă solicitată pentru consum în rețea, conform datelor din tabelul 2.6 (curba C);

Tabel 2.6. Volumele procentuale de apă intrate și ieșite din rezervor

T Ore	0-1	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9	9-10	10-11	11-12
C	1,0	0,5	0,5	0,5	2,0	3,5	5,0	5,5	5,0	4,0	3,5	4,0
ΣC	1,0	1,5	2,0	2,5	4,5	8,0	13,0	15,5	23,5	27,7	31,0	35,0
A_p	-	-	-	-	-	-	-	-	10	10	10	10
ΣA_p	-	-	-	-	-	-	-	-	10	20	30	40
T Ore	12-13	13-14	14-15	15-16	16-17	17-18	18-19	19-20	20-21	21-22	22-23	23-24
C	5,0	5,5	6,0	5,5	5,0	4,0	5,5	7,0	7,0	6,5	5,0	3,0
ΣC	40,0	45,5	51,5	57,0	62,0	66,0	71,5	78,5	85,5	92,0	97,0	100
A_p	10	10	10	10	10	10	-	-	-	-	-	-
ΣA_p	50	60	70	80	90	100	-	-	-	-	-	-

C – Volum consumat % din volumul zilnic mediu;
ΣC – Consum cumulat % din volumul zilnic mediu;
A_p – Volum pompat % din volumul zilnic maxim (curba A);
ΣA_p – Volum pompat cumulat %.

- se reprezintă valorile procentuale ale curbelor volumelor de apă cumulate pentru alimentarea rezervorului prin pompare într-o perioadă de 10 ore (curba A₁₀), respectiv de 15 ore (curba A₁₅);
- pe grafic, pentru un timp de pompare de 10 ore/zi, se determină diferențele maxime pozitive ΔV_1 și negative ΔV_2 între curbele C și A₁₀, măsurate pe axa ordonatelor, rezultând:

$$\Delta V_1 = +\Delta V = 34 \%,$$

$$\Delta V_2 = -\Delta V = -19 \%;$$

- volumul de compensare, în valori procentuale, pentru 10 ore de alimentare a rezervorului, rezultă:

$$V_c = |\Delta V_1| + |\Delta V_2|$$

$$V_c = 34 + 19 = 53 \%;$$

- valoarea reală a volumului de compensare (ec.2.15.a), rezultă pentru un timp de pompare de 10 ore:

$$V_c = \frac{\Delta V_1 + \Delta V_2}{100} \cdot Q_{s,zi,max}, \quad V_c = \frac{53}{100} \cdot 19262$$

$$\Rightarrow V_c = 10.208,9 \text{ m}^3;$$

- în situația unui timp de pompare de 15 ore/zi, se obține

$$\Delta V_1 = +16 \%, \quad \Delta V_2 = -8,5 \%,$$

iar volumul de compensare (ec. 2.15.a) rezultă cu valoarea

$$V_c = \frac{|16| + |-8,5|}{100} \cdot 19262, \quad V_c = 4.719,2 \text{ m}^3.$$

Din analiza comparativă a valorilor obținute ($V_{c,10ore} \approx 10.209 \text{ m}^3$ și $V_{c,15ore} = 4.719 \text{ m}^3$) se constată că al doilea volum de compensare reprezintă circa 46 % din primul. Dar, consumul de energie pentru vehicularea apei în al doilea caz analizat este mult mai ridicat, datorită numărului mare de ore de pompare.

2.5. DETERMINAREA VOLUMULUI DE APĂ PENTRU AVARII

2.5.1. Considerații teoretice și metodica de calcul

Volumul de avarii se calculează conform prevederilor STAS 4165-88. În calcul se vor considera influențele introduse de importanța obiectivului alimentat, tipul și durata posibilă a avariei, caracteristicile conductei de aducțiune, condițiile oferite de teren pentru accesul la locul avariei etc.

Relația de calcul pentru **volumul de avarii**, V_{av} , este următoarea:

$$(2.16) \quad V_{av} = Q_{min}(T_{av} - T_i) - Q'T_{av} \quad (m^3)$$

unde Q_{min} este debitul minim, în m^3/h , necesar pentru funcționarea sistemului de alimentare cu apă pe durata avariei;

T_{av} - durata maximă, în ore, necesară remedierii avariei apărută pe circuitul apei în amonte de rezervor, sau de scoatere din funcțiune a stațiilor de pompare din diverse motive;

T_i - timpul maxim, în ore, în care se admite întreruperea completă a alimentării cu apă a sistemului deservit;

Q' - debitul maxim zilnic (m^3/h), care se poate obține de la alte surse de apă, sau aducțiuni decât cea principală, considerate că funcționează la capacitatea maximă.

În cazul avariilor apărute în sistemul de alimentare cu apă a localităților, debitul minim se determină cu relația:

$$(2.17) \quad Q_{min} = K_{av} \cdot \frac{Q_{s,zi,max}}{24}$$

unde coeficientul $K_{av} \approx 0,6...0,8$, în funcție de mărimea localității.

Durata maximă de remediere a avariilor se diferențiază ca valoare după locul unde s-au produs, precum și după modul de alimentare a rezervoarelor. Pentru cazurile curente întâlnite în practică, standardele și normativele în vigoare, precum și literatura de specialitate menționează următoarele valori [4]:

a - aducțiuni gravitaționale :

- pentru conducte de alimentare executate din beton armat precomprimat cu $D \geq 800$ mm se admite un timp $T_{av} = 18...24$ ore, unde valorile se particularizează în funcție de diametrul și lungimea conductei, distanța de intervenție, modalitățile de intervenție etc;

- pentru conducte de alimentare cu $D < 800$ mm se admite $T_{av} = 9...16$ ore, în funcție de criteriile menționate anterior;

b - pentru aducțiuni prin pompare, T_{av} se va adapta corespunzător duratei de întrerupere admisă sistemelor de alimentare cu energie electrică;

c - pentru alte elemente avariate ale sistemului de alimentare cu apă și **amplasate în amonte de rezervor**, T_{av} se calculează de la caz la caz, dar timpul de întrerupere nu va fi mai mare de 10 ore.

Durata maximă T_i , admisă la întreruperea completă a alimentării cu apă, se consideră în calcule cu următoarele valori [4]:

- **6 ore** pentru localități cu $N \leq 10.000$ locuitori;
- **4 ore** pentru localități cu $10.000 < N \leq 50.000$ locuitori;
- **2 ore** pentru localități cu $50.000 < N \leq 100.000$ locuitori;
- **nici o oră** pentru localități cu $N > 100.000$ locuitori;
- pentru unități industriale, durata întreruperii se determină din considerente tehnico - economice.

2.5.2. Exemplul de calcul nr. 2.5. Determinarea volumului de avarie

Date inițiale și restricții de calcul. Se cere valoarea volumului de avarie înmagazinată în rezervorul de acumulare al unei localități, pentru care datele de calcul au următoarele valori: $N = 38.000$ loc., $Q_{s,zi,max} = 19.262$ m^3/zi , lungimea conductei de aducțiune $L_{CA} = 20$ km, debitul de pompare pentru alimentarea rezervorului $Q_p = 800$ m^3/h , viteza de circulație a apei în conducta de aducțiune, $V_p = 1,75$ m/s.

Dintr-o sursă suplimentară se poate obține, pe o durată redusă de timp, circa 16 % din $Q_{s,zi,max}$.

Mod de calcul.

Succesiunea operațiilor este următoarea:

- prin folosirea ecuației (2.16) se determină valoarea debitului suplimentar Q' :

$$Q' = 16 \% \cdot \frac{Q_{s,zi,max}}{24}, \quad Q' = \frac{0,16 \cdot 19.262}{24} \Rightarrow Q' = 128,4 \text{ m}^3/\text{h};$$

- debitul minim se determină conform ecuației (2.17), pentru un coeficient $K_{av} = 0,70$, având în vedere tipul localității:

$$Q_{min} = K_{av} \cdot \frac{Q_{s,zi,max}}{24}, \quad Q_{min} = 0,7 \cdot \frac{19.262}{24} \\ \Rightarrow Q_{min} = 561,8 \text{ m}^3/\text{h};$$

- pentru $Q_p = 800 \text{ m}^3/\text{h}$ și $V_p = 1,75 \text{ m/s}$ se obține valoarea diametrului interior al aducțiunii:

$$D_{CA} = 1,13 \sqrt{\frac{Q_p}{3600 \cdot V_p}}, \quad D_{CA} = 1,13 \sqrt{\frac{800}{3600 \cdot 1,75}} \\ \Rightarrow D_{CA} = 400 \text{ mm};$$

- pentru o lungime a aducțiunii, $L_{CA} = 20 \text{ km}$ și în condiția de mărime a diametrului, $D < 800 \text{ mm}$, rezultă că se poate adopta o durată maximă necesară remedierii, $T_{av} \approx 10 \text{ ore}$;

- pentru o localitate cu $10.000 < N \leq 50.000$ locuitori, se poate adopta un timp de întrerupere a alimentării cu apă, $T_i \approx 4 \text{ h}$.

Conform ecuației (2.16),

$$V_{av} = Q_{min} \cdot (T_{av} - T_i) - Q' \cdot T_{av}$$

cu datele cunoscute și cele calculate se obține valoarea volumului de avarie:

$$V_{av} = 561,8 (10 - 4) - 128,4 \cdot 10 \Rightarrow V_{av} = 2.087 \text{ m}^3.$$

2.6. DETERMINAREA VOLUMULUI DE APĂ PENTRU REZERVA DE INCENDIU

2.6.1. Considerații teoretice și metodica de calcul

În sistemele centralizate de alimentare cu apă, conform normativelor în vigoare (SR 1343-95 și 1478-90, norme speciale PSI etc), trebuie creată o **rezervă de apă pentru combaterea incendiilor** - V_{inc} . Rezerva de apă trebuie să fie suficientă pentru combaterea tuturor incendiilor teoretice simultane, iar după consumarea acesteia să poată fi refăcută într-un timp determinat (T_{ri}) de condițiile de alimentare ale sistemului.

Volumul rezervei intangibile de apă, V_{inc} , pentru centrele populate se determină cu relația:

$$(2.18) \quad V_{inc} = T_c (a \cdot Q_{s,o,max} + 3,6 \cdot n \cdot Q_{ie} - Q_{si}) + \sum_{i=1}^n 3,6 Q_{ii} T_{ii} \quad (\text{m}^3)$$

unde $Q_{s,o,max}$ este debitul orar maxim al cerinței de apă;

- Q_{ie} - debitul în l/s pentru un incendiu exterior, care este o funcție de numărul de locuitori ai localității, tipul de înălțime a clădirilor, caracteristicile materialelor care ard etc;

- n - numărul de incendii teoretic simultan posibile.

Parametrii n și Q_{ie} sunt stabiliți în funcție de numărul de locuitori, iar valorile sunt prezentate în tabelul 2.7. Debitul pentru incendiu exterior și numărul de incendii simultane pentru centrele populate cu peste 1.000.000 locuitori se determină pe bază de studii speciale. În cazul cartierelor izolate, separate de restul localității prin zone neconstruite mai late de 300 m, se folosesc valorile din tabelul 2.7.

Parametrul T_e reprezintă durata de calcul, în ore, a incendiului exterior și depinde de tipul obiectivului afectat (tabel 2.8). Pentru centrele populate se adoptă valoarea $T_e \approx 3 \text{ ore}$. Durata de funcționare a hidranților interiori este de 10 minute.

Tabel 2.7. Debitul pentru un incendiu exterior Q_{ie} (l/s) și numărul de incendii exterioare simultane n .

Numărul locuitorilor din localitate N	Numărul de incendii exterioare simultane N	Q_{ie} (l/s)	
		Clădiri cu 1-4 caturi	Clădiri cu peste 4 caturi
1	2	3	4
≤ 5.000	1	5	10
5.001...10.000	1	10	15
10.001...25.000	2	10	15
25.001...50.000	2	20	25
500.001...100.000	2	25	35
100.001...200.000	2	30	40
200.001...300.000	3	40	55
300.001...400.000	3	-	70
400.001...500.000	3	-	80
500.001...600.000	3	-	85
600.001...700.000	3	-	90
700.001...800.000	3	-	95
800.001...1.000.000	3	-	100

Tabel 2.8. Timpul teoretic de funcționare a instalațiilor de stingere cu hidranți exteriori

Tipul obiectivului	T_e (ore)
Construcții civile și industriale, depozite deschise obișnuite	3
Rafinării, combinate petrochimice protejate cu instalații fixe	4
Rafinării, unități petrochimice, protejate cu instalații mobile	6

Tabel 2.9. Debit specific, număr jeturi în funcțiune simultană și debitul de calcul al instalației cu hidranți interiori

Destinația și caracteristicile clădirii protejate	l_c (m)	q_{in} (l/s)	n_j	Q_{in} (l/s)
Blocuri de locuințe, clădiri pentru cazare comună, clădiri pentru birouri, școli, localuri pentru alimentație publică, vestiare, băi și spălătorii publice, gări: a) volum mai mic de 25.000 m ³ ; b) volum mai mare de 25.000 m ³	6 6	2,5 2,5	1 2	2,5 5,0
Clădiri care adăpostesc copii de vârstă preșcolară; instituții medicale, aziluri pentru bătrâni sau infirmi, muzee, expoziții, biblioteci, arhive, clădiri de producție de depozitare, industriale, garaje, magazine și depozite anexe. a) volum mai mic de 5000 m ³ ; b) cu un volum de 5000 m ³ sau mai mare.	6 6	2,5 2,5	1 2	2,5 5,0
Cinematografe, cluburi și case de cultură (fără scenă amenajată), săli de concerte și de întruniri, de gimnastică și sport cu o capacitate mai mică de 600 locuitori. a) situate în clădiri de gradul I și II de rezistență la foc; b) situate în clădiri de gradul III și IV de rezistență la foc.	9 9	2,5 5,0	2 2	5 10
Cinematografe, cluburi și case de cultură (fără scenă amenajată), săli de concerte și săli de întruniri, de gimnastică și sport, cu capacitate de 600 locuri sau mai mult.	9	5	2	10
Teatre dramatice sau muzicale, cluburi și case de cultură cu scenă amenajată: a) cu mai puțin de 1000 locuri; b) cu 1000 locuri sau mai mult;	9 9	5 5	3 4	15 20
Clădiri cu înălțimi peste 45 m a) cu volum până la 50000 m ³ ; b) cu volumul peste 50000 m ³ .	9 9	5 5	3 4	15 20

l_c – lungimea minimă la jetul compact; q_{in} – debitul specific minim la un jet, l/s; n_j – numărul jeturilor în funcțiune simultană; Q_{in} – debit de calcul la instalație (l/s)

Q_{ii} este debitul care poate fi asigurat în l/s de la hidranții interiori pentru stingerea unui incendiu (tabel 2.9);

T_{ii} reprezintă timpul de calcul, în ore, de funcționare pentru un incendiu a instalațiilor interioare cu debitul Q_{ii} (tabel 2.10);

Tabel 2.10. Timpul teoretic de funcționare a hidranților interiori

Natura obiectivului	$T_{i,min}$ (min)
Clădiri obișnuite	10
Clădiri înalte monobloc, clădiri cu săli de spectacole, clădiri la care apa de incendiu se ia din bazine exterioare, etc.	60
Clădiri civile și industriale cu înălțimea peste 45 m	120
Clădiri monobloc, clădiri industriale multietajate (coloana pe casa scării, clădiri racordate la turnuri de apă, etc).	180

Coeficientul adimensional a prezintă următoarele valori:

- $a = 0,70$ pentru rețele de distribuție care nu asigură la hidranții exteriori presiunea necesară stingerii în mod direct a incendiului, respectiv nu asigură $p_{min} \geq 0,7$ bari;

- $a = 1,00$ pentru rețelele de distribuție care asigură presiunea necesară hidranților exteriori la stingerea directă a incendiului.

Pentru cazul general al rezervoarelor de acumulare (STAS 1478-90) volumul rezervei de incendiu se determină cu relația:

$$(2.19) \quad V_{inc} = V_i + V_{cons} - V_{al},$$

unde V_i este volumul de apă, în m^3 , necesar stingerii tuturor incendiilor simultane; V_{cons} , - volumul de apă, în m^3 , necesar asigurării consumului de apă potabilă sau industrială pe timp de incendiu; V_{al} , - volumul minim de apă, în m^3 , cu care rezervoarele pot fi alimentate în timpul incendiului.

Pentru calculul volumului minim de alimentare cu apă se folosește relația:

$$(2.20) \quad V_{al} = 3,6 \cdot T_i \cdot Q_{a,min},$$

în care $Q_{a,min}$ este debitul minim de alimentare pe timp de incendiu în secțiunea de intrare în rezervor, l/s; T_i - durata incendiului în ore, iar în cazuri speciale, acea parte din durata incendiului în care se poate asigura alimentarea rezervorului.

Ecuția (2.19), printr-o serie de înlocuiri poate fi transpusă sub forma ecuației (2.18).

Tabel 2.11. Timpul de refacere a rezervei de incendiu T_{ri} STAS 1478-90

Obiectivul alimentat cu apă	T_{ri} , (ore)
Clădiri civile, centre populate	24
Zone industriale cu construcții din categoriile de pericol la incendiu:	
- A și B	24
- C, având $Q_{ie} > 25$ l/s	24
$Q_{ie} \leq 25$ l/s	36
- D și E, cu $Q_{ie} > 25$ l/s	36
$Q_{ie} \leq 25$ l/s	48

În situația consumării rezervei de incendiu, aceasta trebuie refăcută, printr-un proces tehnologic de alimentare.

Debitul de refacere zilnic ($Q_{r,inc}$), trebuie asigurat prin diverse modalități tehnice. Relația de calcul are forma:

$$(2.21) \quad Q_{r,inc} = \frac{24 \cdot V_{inc}}{T_{ri}} \quad (m^3/h)$$

unde T_{ri} este timpul de refacere a rezervei de apă pentru incendiu, în ore. Valoarea T_{ri} este o funcție de tipul obiectivului și categoria de pericol la incendiu (tabel 2.11)

2.6.2. Exemple de calcul

2.6.2.1. Exemplul nr. 2.6. Determinarea debitelor de incendiu

Date inițiale și restricții de calcul. Se cere determinarea debitelor de incendii Q_{ie} și Q_{ii} pentru un centru populat dotat cu obiective social-economice (spital, școală, cinematograf etc.) de

diverse înălțimi, care depășesc patru caturi și cu $N = 38.000$ locuitori. Rețeaua de alimentare cu apă a orașului asigură presiunile de funcționare a hidranților exteriori.

Mod de calcul:

Conform prevederilor SR 1343-91 (tabel 2.7), pentru un centru populat cu $N = 38.000$ locuitori și clădiri cu peste patru caturi, rezultă:

- $n = 2$, respectiv două incendii teoretic simultane;
- debitele pentru un incendiu exterior prezintă valorile $Q_{ie} = 20 \div 25$ l/s, iar pentru acoperirea clădirilor cu peste 4 caturi se adoptă $Q_{ie} = 25$ l/s.

Pentru determinarea debitului pentru un incendiu interior Q_{ii} , conform STAS 1478-90, cu datele redade în tabelul 2.9, se adoptă valorile de calcul după caz. Rezultă:

- pentru un spital, $Q_{ii} = 2,5$ l/s;
- pentru un cinematograf, $Q_{ii} = 5,0$ l/s;
- pentru o școală, $Q_{ii} = 2,5$ l/s,

iar pentru cele două incendii teoretic simultane se adoptă

$$Q_{ii} = 2 \cdot 2,5 \Rightarrow Q_{ii} = 5,0 \text{ l/s.}$$

Recapitulare: $Q_{ie} = 25$ l/s și $Q_{ii} = 5$ l/s.

2.6.2.2. Exemplul nr. 2.7. Determinarea volumului rezervei intangibile de apă pentru incendiu

Date inițiale și restricții de calcul. Se cere calculul volumului rezervei intangibile de apă și debitul de refacere, necesare pentru combaterea incendiilor, volum ce va fi păstrat în rezervorul inclus în sistemul de alimentare cu apă a unei localități cu $N = 38.000$ locuitori.

Se cunosc următoarele date inițiale de calcul: a - debitele $Q_{n,v,max} = 846,3$ m³/h, $Q_{ie} = 25$ l/s și $Q_{ii} = 5$ l/s; b - numărul de incendii teoretic simultane $n = 2$; c - rețeaua de conducte asigură presiunea hidranților exteriori; $K_s = 1,10$, $K_p = 1,05$, apa fiind tratată și $Q < 0,5$ m³/s.

Pe perioada producerii incendiului, se admite că rezervorul este alimentat, în situația cea mai defavorabilă, cu circa 40 % din debitul orar maxim.

Mod de calcul

Succesiunea operațiilor de calcul este următoarea:

a - determinarea debitului maxim orar, care alimentează rezervorul, conform relației:

$$Q_{s,o,max} = K_p \cdot K_s \cdot Q_{n,o,max},$$

$$Q_{s,o,max} = 1,10 \cdot 1,10 \cdot 846,3 \Rightarrow Q_{s,o,max} = 1.024 \text{ m}^3/\text{h};$$

b - calculul volumului pentru acoperirea incendiilor, conform ecuației (2.20), cu luarea în considerare a parametrilor:

- $a = 1$, deoarece este asigurată presiunea la hidranții exteriori;

- debitul asigurat din sursă pentru stingerea incendiului în situația cea mai defavorabilă,

$$Q_{si} = 40 \% \cdot Q_{n,o,max};$$

$$Q_{si} = 0,40 \cdot 1.024 \Rightarrow Q_{si} = 409,6 \text{ m}^3/\text{h};$$

- timpul de calcul pentru un incendiu exterior, în cazul centrelor populate, conform tabelului 2.8 este $T_e = 3$ h;

- timpul de calcul pentru funcționarea hidranților interiori, conform tabelului 2.10 este $T_{ii} = 10$ min = $1/6$ h;

- două incendii teoretic simultane, $n = 2$;

- debitele hidranților exteriori prezintă valorile de calcul, $Q_{ie} = 25$ l/s și interiori, $Q_{ii} = 5$ l/s;

Cu aceste date, rezultă valoarea volumului pentru incendiu:

$$V_{inc} = T_e(a Q_{s,o,max} + 3,6 \cdot n \cdot Q_{ie} - Q_{si}) + 3,6 \cdot Q_{ii} \cdot T_{ii},$$

$$V_{inc} = 3(1 \cdot 1.024 + 3,6 \cdot 2 \cdot 25 - 409,6) + 3,6 \cdot 5 \cdot \frac{1}{6},$$

$$\Rightarrow V_{inc} = 2.407,2 \text{ m}^3,$$

iar prin rotunjire se adoptă $V_{inc} \approx 2.407 \text{ m}^3$.

2.7. CALCULUL VOLUMULUI DE APĂ AL REZERVORULUI DE ACUMULARE

2.7.1. Considerații teoretice și metodica de calcul

Volumul de dimensionare pentru rezervorul de acumulare rezultă din analiza ecuațiilor (2.1.a., 2.2.b și 2.3), precum și a condițiilor la limită și de contur impuse de funcționarea sistemului de alimentare cu apă. Sunt menționate următoarele considerații tehnice:

a - volumul suplimentar, conform ecuației (2.1.a), se determină procentual din rezultatul însumării volumelor de compensare, respectiv de avarie:

$$(2.22) \quad V_{\text{sup}} = p_s \cdot (V_c + V_{\text{av}}) \quad (\text{m}^3),$$

unde p_s este procentul de diminuare, cu valorile $p_s = 10 \dots 20 \%$, în funcție de modul de funcționare al stației de pompare care alimentează rezervorul; pentru o funcționare continuă a stației de pompare se adoptă $V_{\text{sup}} = 0$;

b - în cazul în care rezervorul înmagazinează volumele pentru apa potabilă, apa industrială și pentru stingerea incendiilor, la stabilirea capacității acestuia se va lua în considerare valoarea cea mai mare dintre volumul de avarie, respectiv volumul de incendiu;

c - volumul rezervei de incendiu poate fi redus cu volumul de avarie (V_{av}) numai în cazul în care alimentarea rezervorului din sursă are loc fără întrerupere, chiar în timpul incendiului și în condițiile de siguranță prevăzute de prescripțiile legale în vigoare;

d - volumele de apă justificate economic (V_{jus}) se determină pentru fiecare caz care solicită astfel volume prin calcule de dimensionare specifice.

2.7.2. Exemplul de calcul nr.2.8.

Determinarea volumului pentru rezervorul care deservește un sistem de alimentare cu apă aferent unei localități cu o populație de 38.000 locuitori.

Datele inițiale de calcul și restricțiile problemei. Se cere proiectarea volumului de înmagazinare pentru un rezervor care deservește sistemul de alimentare cu apă al unei localități urbane cu o populație de circa 38.000 locuitori.

Datele de calcul sunt constituite din volumele caracteristice rezervorului, determinate anterior și prezentate în exemplele de calcul nr. 2...7.

Valorile luate în considerare la calcul sunt următoarele:

a - volumul de compensare pentru un regim de pompare de 24 ore (exemplul de calcul 2b), $V_c = 3.543 \text{ m}^3$;

b - volumul de avarie, $V_{\text{av}} = 2.087 \text{ m}^3$;

c - volumul rezervei de incendiu $V_{\text{inc}} = 2.407 \text{ m}^3$;

d - volumul suplimentar $V_{\text{supl}} = 0$;

e - volumul justificat economic $V_{\text{jus}} = 0$;

f - volumul necesar pentru acoperirea sorbului, $V_{\text{dev}} = 0$.

Mod de calcul

Prin folosirea relațiilor (2.1.a) și (2.1.b) se obține:

$$V_R^{(1)} = V_c + V_{\text{inc}} + V_{\text{sup}} + V_{\text{jus}},$$

$$V_R^{(2)} = V_c + V_{\text{av}} + V_{\text{sup}} + V_{\text{jus}}$$

care pentru $V_{\text{sup}} = 0$ și $V_{\text{jus}} = 0$ sunt puse sub forma:

$$V_R^{(1)} = V_c + V_{\text{inc}}, \text{ sau } V_R^{(1)} = 3.543 + 2.407$$

$$V_R^{(2)} = V_c + V_{\text{a}}, \text{ sau } V_R^{(2)} = 3.543 + 2.087$$

de unde, prin analiză comparativă, rezultă:

$$V_R^{(1)} = 5.950 \text{ m}^3 > V_R^{(2)} = 5.630 \text{ m}^3.$$

În acest caz se adoptă valoarea:

$$V_R = 5950 \text{ m}^3,$$

volum care corespunde variantei ce acoperă consumurile în situația de funcționare cea mai defavorabilă.

Luând în considerare volumele standard ale rezervoarelor, se adoptă pentru acoperirea volumului de 5950 m^3 o soluție tehnică reprezentată de două rezervoare cuplate în paralel, fiecare cu un volum de 3.000 m^3 .

Deoarece volumul unui rezervor este mai mare decât volumul minim fără restricții ($V_R = 3.000 \text{ m}^3 > V_{\min} = 2.000 \text{ m}^3$), apare ca necesar calculul volumului de apă pentru acoperirea sorbului (V_{dev}).

Considerând un rezervor cu dispunerea sorbului în bașa de aspirație și având în vedere că volumul adoptat ($V_R = 3.000 \text{ m}^3$) este mai mare decât cel calculat ($V_{R,\text{calc}} = 5.950 / 2 = 2.975 \text{ m}^3$) se consideră că este îndeplinită restricția. În acest caz se adoptă $V_{\text{dev}} = 0$.

Rezultă că din punct de vedere tehnic sunt necesare două rezervoare de înmagazinare, fiecare având un volum de 3000 m^3 , iar în total rezultă un volum înmagazinat:

$$V_{\text{tot}} = V_{R,1} + V_{R,2}, \quad V_{\text{tot}} = 3.000 + 3.000 \Rightarrow$$

$$V_{\text{tot}} = 6.000 \text{ m}^3.$$

BIBLIOGRAFIE

1. Bârsan E., Vâscu V. și Gavrilăș G. – *Alimentări cu apă. Îndrumar de proiectare*. Editura Universității Tehnice "Gh. Asachi" Iași, 1993.
2. Mănescu Al., Sandu M., Ianculescu O. - *Alimentări cu apă*. Editura Didactică și Pedagogică, București, 1994.
3. Mănescu Al. – *Alimentări cu apă. Aplicații*, Editura H.G.A., București, 1998.
4. Pâslărașu I., Teodorescu M., Rotaru C. - *Alimentări cu apă*. Editura Tehnică, București, 1981.
5. Rojanschi V. - *Alimentarea cu apă în zootehnie*. Editura Ceres, București, 1986.
6. Trofin P. - *Alimentări cu apă*. Editura Didactică și Pedagogică, București, 1981.
7. Vintilă Șt., Cruceru T., Onciu L. - *Instalații sanitare și de gaze*. Editura Didactică și Pedagogică, București, 1995.
- 8.*** - *Manualul inginerului hidrotehnician*. Secțiunea Alimentări cu apă, vol.II, Editura Tehnică, București, 1970.
9. STAS 1343/0-89. - *Alimentări cu apă. Determinarea cantităților de apă. Prescripții generale*.
10. SR 1343/1-95. - *Alimentări cu apă. Determinarea cantităților de apă de alimentare pentru centre populate*.
11. STAS 1478-90. - *Instalații sanitare. Alimentarea cu apă la construcții civile și industriale. Prescripții fundamentale de proiectare*.
12. STAS 4165/83. - *Alimentări cu apă. Rezervoare din beton armat și beton precomprimat. Prescripții generale*.
13. STAS 10898-85. - *Alimentări cu apă și canalizări. Terminologie*.
14. STAS 4068/2-87. - *Debite și volume maxime de apă. Probabilitățile teoretice ale debitelor maxime în condiții normale și speciale de exploatare*.

16. STAS 4163/1-95. - *Alimentări cu apă. Rețele exterioare de distribuție. Prescripții fundamentale de proiectare.*

17. STAS 4163/2-95 - *Alimentări cu apă. Rețele de distribuție. Prescripții de calcul.*

18. STAS 4163/3-96 - *Alimentări cu apă. Rețele de distribuție. Prescripții de execuție și exploatare.*

19. STAS 4273/83. - *Construcții hidrotehnice. Încadrarea în clase de importanță.*

20. STAS 6054/77 *Teren de fundare. Adâncimi maxime de îngheț. Zonarea teritoriului.*

21. STAS 6819/82 - *Alimentări cu apă. Aducțiuni. Studii, proiectare și datele constructive.*

22. STAS 8591/1-91 - *Amplasarea în localități a rețelilor edilitare subterane, executate în săpătură.*

23. STAS 10110/85 - *Alimentări cu apă. Stații de pompare. Prescripții generale de proiectare.*

CAPITOLUL 3

PROIECTAREA INSTALAȚIEI HIDRAULICE

3.1. STRUCTURA INSTALAȚIEI HIDRAULICE

3.1.1. Elemente structurale pentru rezervoare

Rezervoarele de acumulare pentru apă rece sunt constituite din două elemente principale (fig. 3.1):

1 - **cuva rezervorului**, care formează partea fixă a proiectului și prezintă parametri structurali diferențiați în funcție de volumul tipizat sau impus de consumator;

2 - **camera vanelor**, care reprezintă partea adaptabilă a proiectului, conține o serie de instalații necesare pentru asigurarea funcționării și exploatării optime a rezervorului.

Instalațiile aferente unui rezervor și construcțiilor conexe sunt constituite din următoarele:

a - **instalația hidraulică**, care are rolul de a alimenta, menține la parametri de calitate și distribui apa din rezervor;

b - **instalația electrică**, care are rolul de a alimenta cu energie electrică de înaltă și joasă tensiune circuitele de iluminare, agregatele de pompare principale și auxiliare, dispozitivele de semnalizare și automatizare etc;

c - **instalația de ventilație** pentru cuva rezervorului, camera vanelor și stația de pompare adosată rezervorului;

d - **instalația de automatizare** pentru procesele funcționale și teletransmisie a datelor la un punct dispecer;

e - **instalația sanitară**, în cazul existenței stației de pompare, sau a altor construcții;

f - **instalația de încălzire** (în cazul construcțiilor aferente stației de pompare cu poziție semiîngropată sau supraterană);

g - **instalația de telecomunicație** etc.

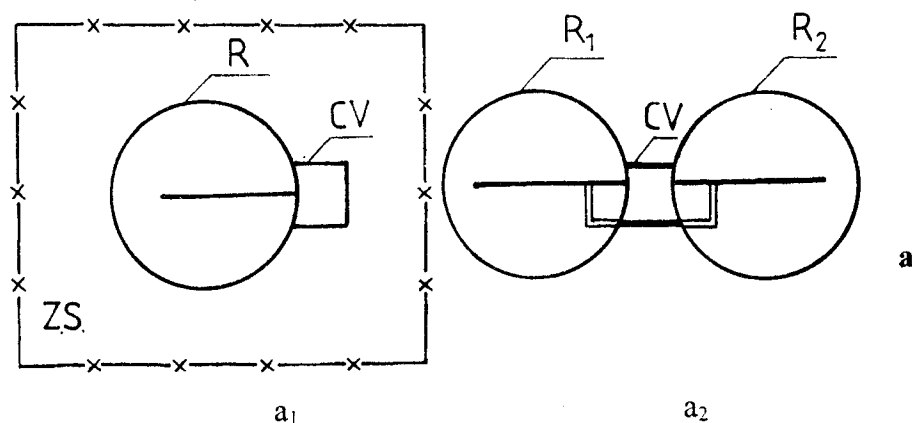


Fig.3.1. Elemente structurale la rezervoare: a - vedere în plan; a₁ - un rezervor; a₂ - două rezervoare cuplate în paralel; b - secțiune transversală printr-un rezervor; R - rezervor; CV - camera vanelor; ZS - zona de protecție sanitară; 1 - perete; 2 - fundația; 3 - camera vanelor; 4 - aerisire; 5 - izolație termică (umplutură).

În funcție de numărul compartimentelor de înmagazinare a apei și de modul de distribuție la consumator, rezervoarele pot fi

prevăzute cu cameră de vane, sau cu cameră de vane și stație de pompare. Pentru rezervoarele cu volume mici și cu distribuții gravitaționale, în camera de vane este prevăzută instalația hidraulică, iar în cazul distribuției prin pompare a apei, în același spațiu vor fi incluse și agregatele hidromecanice.

În cazul rezervoarelor cu capacități mari, precum și la cuplarea mai multor rezervoare, când distribuția apei se realizează în mod gravitațional, camera vanelor este comună și înglobează ansamblul instalațiilor hidraulice. Pentru o distribuție prin pompare, camera vanelor își poate reduce dimensiunile la strictul necesar, iar în zona rezervoarelor se realizează o stație de pompare. Pentru obținerea unei structuri unitare, camera vanelor poate fi înglobată în construcția stației de pompare (fig.3.2).

Structura instalației hidraulice se diferențiază și după pozițiile posibile ale rezervorului față de sistemul alimentat. Se deosebesc în acest caz instalații pentru rezervoare de trecere, rezervoare de capăt, rezervor de trecere + contrarezervor etc.

3.1.2. Modalități tehnice pentru distribuția apei la sistemul deservit sau consumator

Instalația hidraulică a unui rezervor este constituită din totalitatea conductelor, fittingurilor, armăturilor, dispozitivelor, agregatelor, echipamentelor etc, prin intermediul cărora se asigură funcționarea optimă a rezervorului și integrarea acestuia în sistemul de alimentare cu apă. În funcție de structura constructivă a rezervorului, valoarea debitelor vehiculate, tipul de distribuție a apei, restricțiile adoptate etc., proiectantul trebuie să adapteze proiectul directiv la situația reală de funcționare. Proiectele tip prezintă instalațiile hidraulice doar pentru varianta maximă de dimensionare [25], [26].

Instalația hidraulică se diferențiază după tipul construcției, poziția rezervorului față de sistem, funcțiile rezervorului, modul de vehiculare a apei la rețeaua de distribuție, respectiv la consumator etc. În funcție de modul de distribuție a apei la sistemul deservit (consumator), se admite următoarea clasificare:

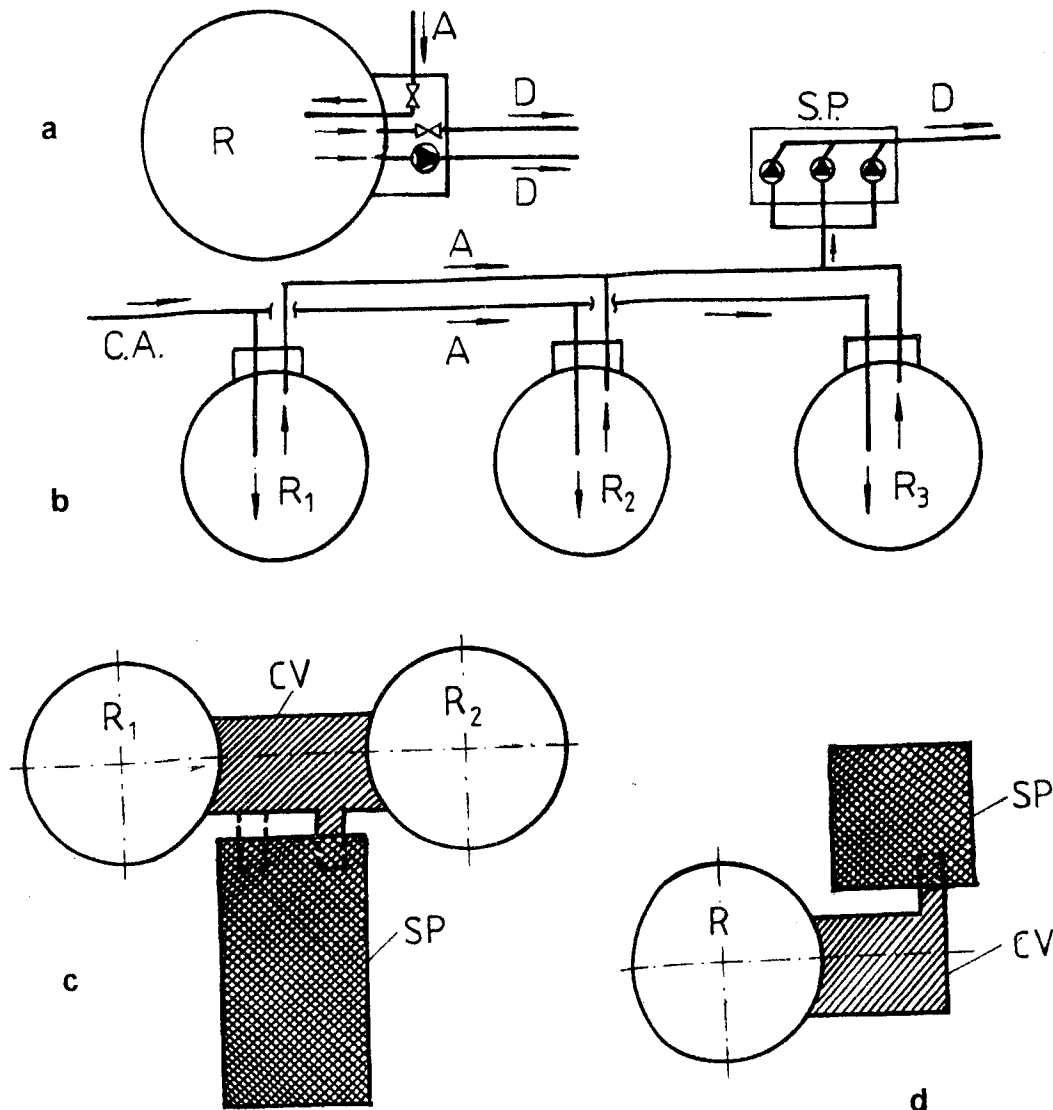


Fig. 3.2. Modul de cuplare a rezervoarelor cu stațiile de pompare: a - un rezervor cu stația de pompare în camera vanelor; b - trei rezervoare cuplate în paralel și deservite de o stație de pompare; c - două rezervoare cu o stație de pompare adosată; d - două rezervoare cu o stație de pompare adosată.

1 - **distribuție gravitațională**, situație în care instalația hidraulică este amplasată în camera vanelor;

2 - **distribuție prin pompare**, situație în care instalația hidraulică este amplasată în camera vanelor, sau într-o structură constructivă separată de rezervor (stația de pompare);

3- **distribuție mixtă**, respectiv gravitațional + pompare, când rezervorul deservește zone de consum cu presiuni diferite, iar instalația hidraulică este amplasată în mod diferențiat, respectiv în camera vanelor și în stația de pompare.

Instalația hidraulică a rezervoarelor a fost tipizată pe tipuri de distribuții, destinația apei, numărul zonelor de presiune, modalități de pompare etc.

În cazul rezervoarelor cu distribuții prin pompare se utilizează următoarele scheme funcționale pentru instalația hidraulică [24]:

A - Instalație hidraulică cu conductă unică și grup de pompare unic, pentru distribuția volumului cumulat de apă în scop menajer + tehnologic + incendiu (fig. 3.3).

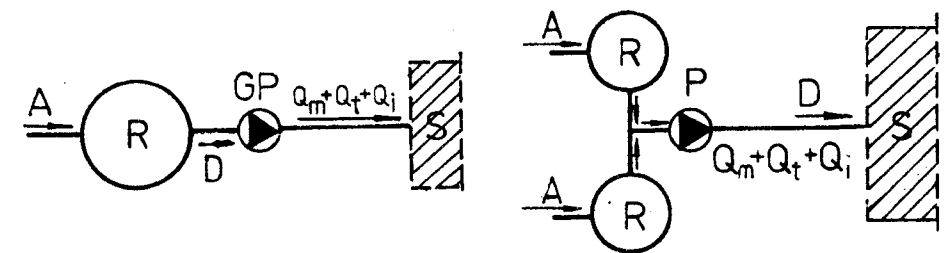


Fig. 3.3. Instalație hidraulică cu conductă unică

B - Instalație hidraulică cu conducte de distribuție diferențiate după natura consumului. Prima conductă este alimentată de un grup de pompare și distribuie apa menajeră + tehnologică. A doua conductă, care dispune de un grup de pompare propriu, este folosită pentru distribuția volumului de apă necesar stingerii incendiilor (fig. 3.4).

C - Instalație hidraulică cu conductă unică pentru distribuția volumelor de apă destinate consumului menajer + tehnologic +

incendiu, dar cu grupuri de pompare separate și cuplate în paralel pentru apa menajeră + tehnologică, respectiv incendiu (fig.3.5).

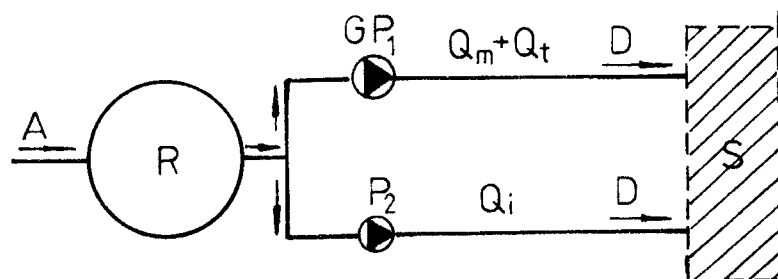


Fig.3.4. Instalație hidraulică cu conducte diferențiate de distribuție.

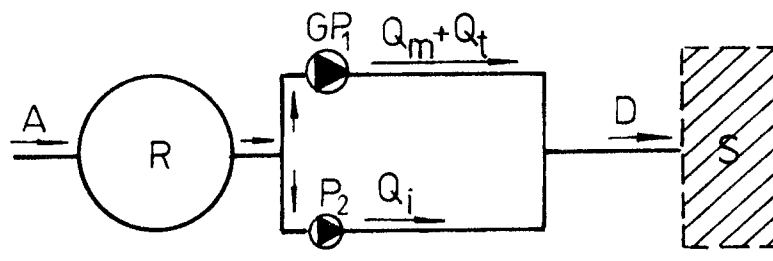


Fig.3.5. Instalație hidraulică cu conductă unică de distribuție și grup de pompare separat.

D – Instalație hidraulică cu conducte de distribuție independente și diferențiate ca echipare. Prima conductă distribuie apa pentru consumul menajer cu ajutorul unui grup de pompare propriu. A doua conductă distribuie volumul cumulat de apă tehnologică+ incendiu, prin intermediul unui grup de pompare separat (fig.3.6).

E - Instalație hidraulică cu două conducte de distribuție independente și echipate diferențiat, pentru alimentarea cu apă menajeră a consumatorilor într-un sistem cu două zone diferite de presiune. Prima conductă (D_1) distribuie gravitațional volumul de apă menajer + incendiu pentru prima zonă de presiune (ZP_1). A doua conductă (D_2) este echipată cu un grup de pompare pentru a

distribui volumul de apă menajer + incendiu în zona de presiune înaltă (ZP_1 fig.3.7).

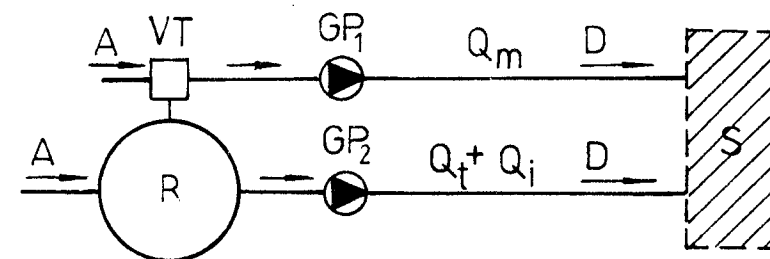


Fig. 3.6. Instalație hidraulică cu conducte independente de distribuție.

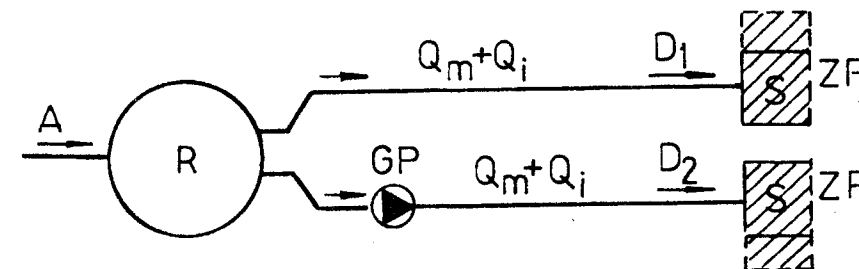


Fig.3.7. Instalația hidraulică pentru o distribuție gravitațională și prin pompare într-un sistem cu zone diferite de presiune.

F - Instalație hidraulică cu două conducte de distribuție independente și echipate diferențiat, pentru a livra volumele de apă menajer + incendiu într-un sistem de alimentare cu două zone diferite de presiune (ZP_1 și ZP_2). Fiecare conductă este echipată cu un grup de pompare dotat pentru zona de presiune deservită (fig.3.8).

G - Instalație hidraulică cu conducte de distribuție independente, care asigură volume de apă în scopuri speciale (instalații de incendiu din dotarea obiectivelor civile și industriale, instalații de spălare, consumuri tehnologice etc.). Fiecare conductă de distribuție este dotată cu un grup de pompare specializat pe parametrii de lucru ai instalației deservite (fig.3.9).

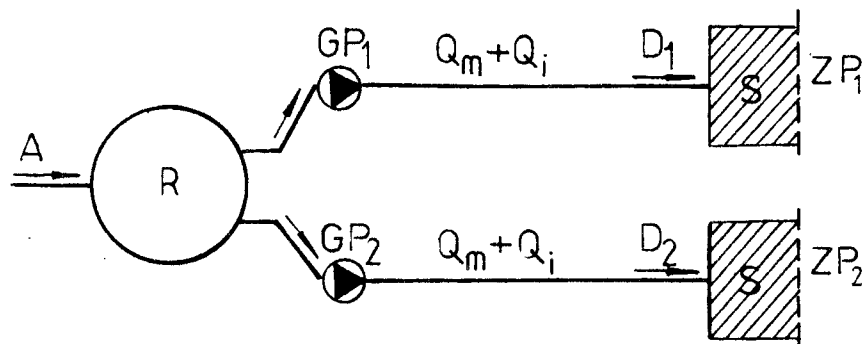


Fig.3.8. Instalația hidraulică pentru distribuția apei în două zone cu presiuni mari și diferențiate.

În cazul amplasării rezervorului de acumulare la o cotă geodezică care asigură presiunile în sistemul alimentat, distribuția apei se realizează în mod gravitațional. În această situație instalația hidraulică poate prezenta următoarea componentă [26]:

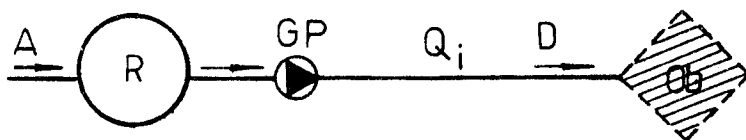


Fig.3.9. Instalația hidraulică la un rezervor cu funcții speciale.

H - instalație hidraulică cu o singură conductă pentru distribuția volumului de apă menajer + tehnologic + incendiu, dacă sunt satisfăcute restricțiile dimensionale, precum și cele tehnologice (fig.3.10.a);

I - instalație hidraulică cu două conducte cuplate în paralel, pentru distribuția volumului de apă menajer + tehnologic + incendiu; numărul conductelor de distribuție se stabilește în funcție de dimensiunile admise și restricțiile privind pierderile de presiune, viteze, amplasament etc (fig.3.10.b);

J - instalație hidraulică cu conducte de distribuție diferențiate pentru volumele de apă menajeră, tehnologică și incendiu (fig.3.10.c);

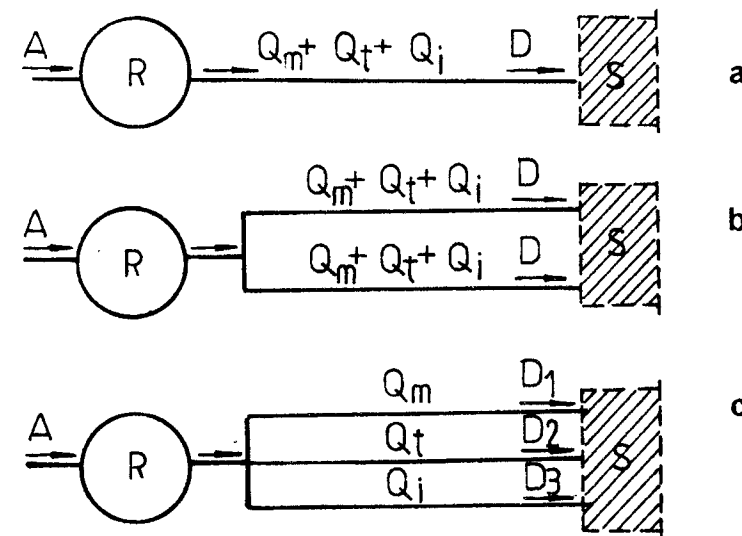


Fig.3.10 Instalație hidraulică pentru distribuția gravitațională: a -cu conductă unică; b - două conducte de distribuție pentru același consum; c - trei conducte de distribuție diferențiate pe natura consumului.

K - instalație hidraulică cu o conductă de distribuție pentru volume de apă în scopuri speciale (incendiu, spălare, amestec etc).

Instalația hidraulică se adaptează în funcție de numărul rezervoarelor deservite. Pentru un rezervor, sau două rezervoare cuplate în paralel, proiectele tip prezintă în detaliu structura funcțională a acestora. În cazul cuplării mai multor rezervoare va fi întocmit un proiect de specialitate.

Instalațiile de pompare se diferențiază după tipul pompelor utilizate (agregate orizontale, agregate verticale, etc.), natura fluidului vehiculat, parametrii funcționali ceruți de sistemul deservit (cum ar fi zonele de presiune), fapt care influențează structura construcției stației de pompare, precum și pe cea a instalațiilor auxiliare.

3.1.3. Structura instalației hidraulice

Instalația hidraulică este amplasată în camera vanelor la rezervoarele care asigură o distribuție gravitațională. La rezervoarele care distribuie apa prin pompare, instalația hidraulică poate fi amplasată în mod diferențiat (fig. 3.11).

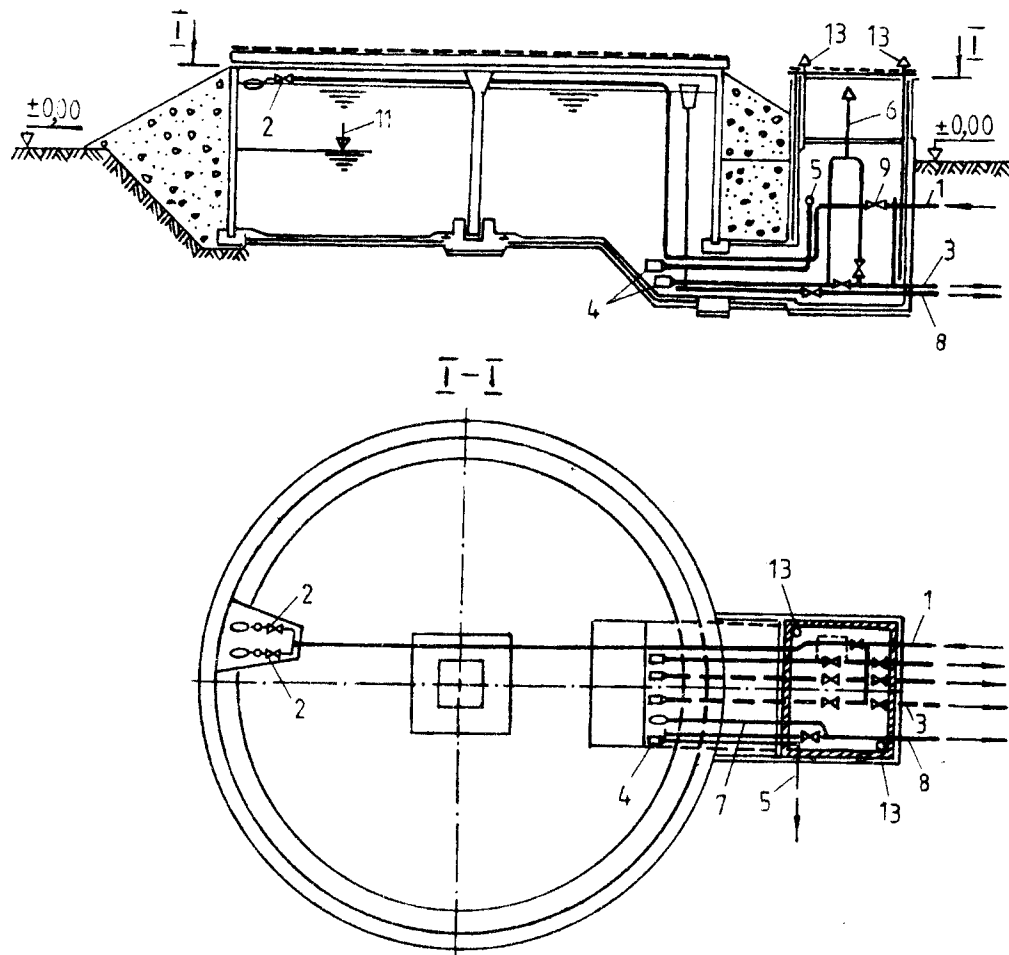


Fig.3.11. Schema generală a instalației hidraulice amplasată în camera vanelor la rezervoarele de înmagazinare: a - vedere în secțiune transversală; b - secțiune transversală.

Instalația hidraulică poate fi amplasată în camera vanelor sau într-o construcție separată de rezervor (stația de pompare).

În principiu, elementele structurale ale instalației hidraulice aferente rezervoarelor de înmagazinare a apei reci sunt următoarele (fig.3.11):

- 1 - conducta de alimentare a rezervorului;
- 2 - conducta de preaplin a cuvei rezervorului;
- 3 - conducta de golire a rezervorului;
- 4 - conducta de distribuție (plecare) la sistemul deservit;
- 5 - conducta de by-pass a rezervorului;
- 6 - conducta de alimentare a pompelor mobile de incendiu;
- 7 - conductele din rețeaua interioară a pompelor (aspirație + refulările individuale);
- 8 - armături de preluare, derivare și reglare a debitului;
- 9 - aparatura de monitorizare a parametrilor funcționali;
- 10 - agregatele de pompare a apei în sistem;
- 11 - instalația de spălare a rezervorului;
- 12 - agregatul de pompare pentru golirea rezervorului și evacuarea apei (inclusiv din bașă) la rețeaua de canalizare etc.

Numărul și tipul elementelor componente ale instalației hidraulice diferă după rolul rezervorului, tipul distribuției, modul de golire, poziția emisarului etc. Instalația hidraulică este prezentată în proiectele tip și se adaptează de la caz la caz, dar cu respectarea strictă a funcțiilor rezervorului.

Instalația hidraulică trebuie să contribuie la buna funcționare a rezervorului prin asigurarea tranzitării debitului maxim prevăzut în schema de alimentare. Totodată, instalația trebuie să realizeze o circulație adecvată a apei în cuvă, pentru a păstra nealterată

calitatea acesteia. De asemenea, prin proiectare trebuie micșorat la minim numărul de treceri prin pereți a conductelor.

3.2. ELEMENTE DE CALCUL HIDRAULIC

3.2.1. Parametrii generali de calcul

Calculul hidraulic al conductelor și elementelor funcționale ale instalației determină legătura dintre caracteristicile geometrice și constructive ale componentelor (diametru, lungime, tip de armături etc.) cu caracteristicile curgerii fluidului (debit, viteză, presiune etc.), precum și cu parametrii de stare fizică a fluidului considerat (temperatură, viscozitate cinematică și dinamică, densitate etc.).

La realizarea instalației hidraulice și lucrărilor aferente sunt utilizate o serie de elemente funcționale, de tipul: tuburi și țevi, fittinguri de îmbinare și elemente de ansamblare, armături de reglare-control-derivare, dispozitive cu funcții diverse etc. Pentru efectuarea calculului hidraulic trebuie cunoscuți parametrii generali de natură geometrică, stare fizică, chimică și mecanică, specifici componentelor structurale, precum și ale apei.

Pentru turburile și țevile din care se realizează conductele din cadrul instalației hidraulice aferente rezervorului, precum și a celor de alimentare și plecare de la rezervor, trebuie cunoscuți următorii parametrii de natură geometrică:

- diametrul nominal D_n , care reprezintă cu aproximație diametrul interior efectiv;
- diametrul exterior D_e , diametrul interior D_i și grosimea peretelui conductei s ;
- lungimea conductei L și lungimile caracteristice ale tronsoanelor l_i ;
- forma secțiunii de curgere a conductei;
- rugozitatea absolută k și rugozitate echivalentă k_e ;
- panta geodezică a tronsoanelor i , cotele geodezice în nodurile instalației z_i etc.

Parametrii principali care definesc natura hidraulică a instalației sunt: presiunile caracteristice, vitezele specifice (medie, economică, maximă și minimă), debitul volumic vehiculat în cazul apei, pierderea de sarcină admisă, panta hidraulică, celeritatea etc. Dintre parametrii de stare fizică a fluidului vehiculat trebuie luați în considerare: temperatura t , densitatea ρ , viscozitatea cinematică ν , modulul de elasticitate al apei E_a , presiunea de vaporizare p_{vap} etc.

De asemenea, mai trebuie cunoscuți parametrii de natură mecanică ai conductelor și armăturilor: E - modul de elasticitate; σ_a - rezistența admisibilă la întindere sau compresiune; α - coeficient de dilatare liniară; μ - coeficientul lui Poisson etc.

O conductă, un fitting, o armătură etc, în general orice element constructiv al instalației hidraulice, este definit cu ajutorul următorilor parametri nominali: diametrul, D_n și presiunea, P_n . Aceștia prezintă valori standardizate în funcție de materialul de execuție, natura fluidului transportat, condițiile de exploatare etc.

3.2.2. Parametrii de stare fizică a apei

Parametrii principali de stare fizică a apei considerați în calculul hidraulic al instalației, sunt: temperatura (t), densitatea (ρ), greutatea specifică (γ), viscozitatea cinematică (ν) sau dinamică (η), coeficientul de elasticitate (ε sau E_a), presiunea de vaporizare (p_{vap}), coeficientul de absorbție a gazelor etc.

La calculul hidraulic al mișcării permanente a conductelor pentru transportul apei considerată convențional rece se admite densitatea cu o valoare constantă, respectiv $\rho = 1.000 \text{ Kg/m}^3$. Dacă se consideră variația densității cu temperatura, valorile pot fi preluate din tabelul 3.1. Între densitate și greutatea specifică există relația de recurență:

$$(3.1) \quad \gamma = \rho \cdot g$$

unde g este accelerația gravitațională ($g = 9,8062 \text{ m/s}^2 \cong 9,81 \text{ m/s}^2$ pe latitudinea medie a teritoriului României).

Viscozitatea reprezintă o caracteristică a fluidelor reale de a opune o anumită rezistență la deformarea internă produsă de fenomenul de curgere. În calculul hidraulic se folosește fie viscozitatea dinamică η (u.m.=N·s/m²), sau viscozitatea cinematică ν (u.m. = m²/s). Ultima este definită prin relația:

$$(3.2) \quad \nu = \eta / \rho.$$

Tabel. 3.1. Parametrii de stare fizică a apei

t °C	ρ Kg/m ³	γ N/m ³	ν m ² /s	E_a sau ϵ N/m ²	ρ_{vap} mca
0	999,87	9808,72	$1,788 \times 10^{-6}$	$1,95 \times 10^9$	0,062
4	1000,0	9810	$1,571 \times 10^{-6}$		0,083
5	999,99	9809,90	$1,523 \times 10^{-6}$		0,089
10	999,73	9807,35	$1,307 \times 10^{-6}$	$2,03 \times 10^9$	0,125
15	999,13	9801,46	$1,142 \times 10^{-6}$		0,174
20	998,23	9792,63	$1,005 \times 10^{-6}$	$2,11 \times 10^9$	0,238
25	997,07	9781,26	$0,902 \times 10^{-6}$		0,323
30	995,67	9767,52	$0,806 \times 10^{-6}$	$2,15 \times 10^9$	0,432
35	994,06	9751,73	$0,729 \times 10^{-6}$		0,573
40	992,21	9733,48	$0,656 \times 10^{-6}$		0,752

Viscozitatea dinamică, respectiv cinematică, a fluidelor este o funcție de temperatură. Viscozitatea lichidelor scade odată cu creșterea temperaturii. La gaze, valorile viscozității cresc odată cu creșterea temperaturii. Pentru apa convențional curată, variația viscozității cinemate se determină cu relația lui Poiseuille:

$$(3.3) \quad \nu_t = \nu_0 \cdot (1 + 0,0337 \cdot t + 0,000222 \cdot t^2)^{-1},$$

unde t este temperatura apei în grade Celsius; $\nu_0 = 1,79 \cdot 10^{-6}$ m²/s, pentru temperatura de 0 °C. Valorile $\nu = \nu(t)$ pentru valorile uzuale de temperatură sunt prezentate în Tabelul 3.1.

Coeficienții de compresibilitate (β) și elasticitate ai apei (E_a sau ϵ) variază în raport cu temperatura și presiunea (tabel 3.1). Legătura dintre acești parametri este dată prin relația:

$$(3.4) \quad \frac{1}{\beta} = E_a = \rho \frac{dp}{d\rho}.$$

Modulul de elasticitate pentru apă rece poate fi considerat cu valoarea medie $E_a \approx 2,07 \cdot 10^9$ Pa $\pm$ 10%. La temperatura de 20 °C, modulul de elasticitate prezintă valorile $(1,942 \dots 2,080) \cdot 10^9$ Pa, pentru un ecart de presiune $p = 5 \dots 40$ bari. Pentru o presiune constantă $p = 5$ bari și o variație a temperaturii apei $t = 0 \dots 20$ °C, rezultă $E_a = (1,854 \dots 1,942) \cdot 10^9$ Pa etc.

Presiunea de vaporizare a apei este o funcție de temperatură ($p_{vap} = f(t)$). Valorile uzuale sunt redată în tabelul 3.1.

3.2.3. Calculul presiunilor și forțelor de presiune

3.2.3.1. Presiuni caracteristice în instalațiile hidraulice

În instalația hidraulică aferentă rezervoarelor, precum și în conductele de alimentare și distribuție a apei la consumator, presiunea poate fi de tip manometric ($p > p_{at}$), vacuumetric ($p < p_{at}$) și egală cu presiunea atmosferică ($p = p_{at}$). În cazul conductelor, care funcționează cu presiuni vacuumetrice trebuie respectată condiția $p > p_{min}$, în scopul evitării fenomenului de dezamorsare.

În anumite situații funcționale, presiunea într-o serie de secțiuni ale instalației hidraulice poate scădea sub o valoare critică ($p < p_{cr}$), fapt ce determină inițierea și dezvoltarea fenomenului de cavitație. Pentru transportul apei în conducte se consideră presiunea critică ca fiind egală cu presiunea de vaporizare ($p_{cr} = p_{vap}$). Condiția de neapariție a fenomenului de cavitație este dată de relația $p > p_{cr}$.

Presiunile care caracterizează elementele componente ale instalației (conducte, fittinguri, armături, flanșe, garnituri, etc.) sunt următoarele: presiunea de regim, presiunea nominală, presiunea maximă, presiunea de încercare [14]. **Presiunea de regim** (sau de lucru, p_r) este presiunea maximă admisibilă la care poate fi folosită conducta la o anumită temperatură a apei. **Presiunea nominală**

(p_n) este un parametru convențional, care reprezintă presiunea maximă la care se poate folosi conducta pe durata de funcționare. Presiunile nominale standardizate pentru elementele instalațiilor hidraulice considerate de *joasă presiune* sunt: 1; 2,5; 6; 10; 16 bari. Pentru instalațiile de *medie presiune* se consideră $P_n = 25$ și 40 bari.

Presiunea de încercare (p_i) reprezintă presiunea la care se realizează încercarea hidraulică de rezistență și de etanșitate a tuburilor, fittingurilor și armăturilor.

În comparație cu valoarea presiunii de serviciu specifică unui element al instalației (p_s), aflată în exploatare, în funcție de presiunea existentă la un moment dat în punctul considerat, pot apărea următoarele situații funcționale:

- conducte cu *suprapresiune*, dacă $p > p_s$;
- conducte cu *subpresiune*, dacă $p < p_s$.

Presiunile de serviciu ale conductelor se obțin din analiza parametrilor funcționali de bază, rezultați pe traseul tehnologic al fiecărui tip de instalație hidraulică, în corelație cu linia piezometrică și situațiile de exploatare.

Unitățile de măsură ale presiunii în S.I. sunt *pascalul* ($1 \text{ Pa} = 1 \text{ N/m}^2$) și multiplul acestuia, *barul* ($1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa}$). Ca unități de măsură tolerate se admit *metrul coloană apă* (mca), cu echivalența $1 \text{ mca} = 9,81 \times 10^3 \text{ Pa} = 9,81 \times 10^{-2} \text{ bari}$, milimetrul coloană mercur (mmHg) etc.

3.2.3.2. Calculul forțelor de presiune

Forțele de presiune sunt forțe de legătură, care se exercită la contactul dintre apă și pereții solizi ai rezervoarelor, respectiv conductelor, armăturilor etc (fig.3.12). Pe suprafețe plane, forța de presiune și coordonatele punctului de aplicare se calculează cu relațiile:

$$(3.5) \quad F_p = \rho g h_G A, \\ y_C = y_G + \frac{I_{Gx}}{h_G A}, \quad x_C = \frac{I_{xy}}{h_G A}$$

Pe suprafețe curbe, componentele forței de presiune se determină într-un sistem de axe cartezian cu relațiile:

$$(3.6) \quad \bar{F}_{p,x} = \rho g h_{G,x} A_{x,y}, \quad \bar{F}_{p,y} = \rho g h_{G,y} A_{x,y}, \quad \bar{F}_{p,z} = \rho g V_p$$

unde F_p este forța rezultantă; $F_{p,x,y,z}$ - proiecțiile forței F_p pe cele trei axe; h_G - ordonata centrului de greutate G al suprafeței A ; $A_{x,y}$ - proiecțiile suprafeței A pe planele care au ca normală axele Ox , respectiv Oy ; $h_{G,x,y}$ - ordonatele centrelor de greutate $G_{x,y}$ ale suprafețelor $A_{x,y}$; V_p - volumul corpului de presiune.

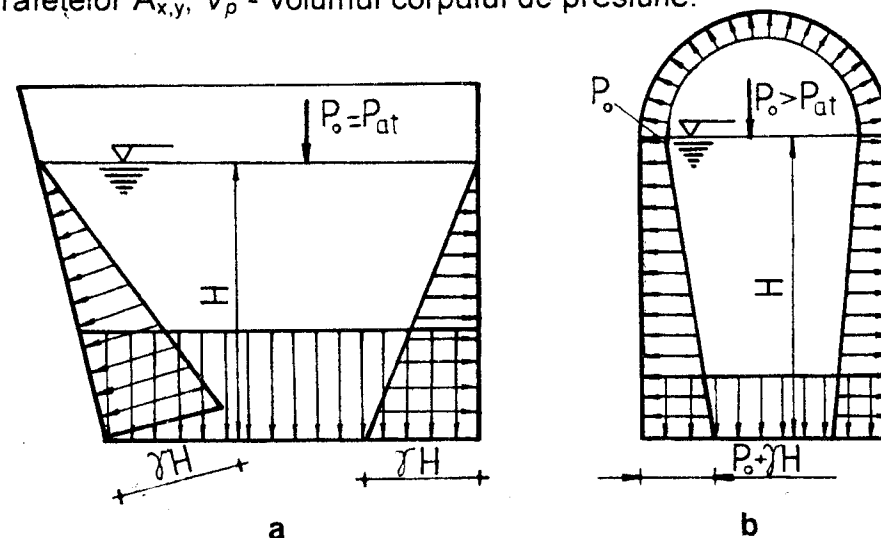


Fig.3.12. Diagrame de presiune pe pereții rezervoarelor:
a - rezervoare deschise; b - rezervoare sub presiune

În cazul suprafețelor curbe, care prezintă una sau două axe de simetrie, se obține o rezultantă unică și direcția acesteia față de orizontală, conform relațiilor:

$$(3.7) \quad F_p = \sqrt{F_{px,y}^2 + F_{pz}^2}, \\ F_p = \sqrt{F_{px}^2 + F_{py}^2 + F_{pz}^2}, \quad \text{tg}\theta = \frac{F_{pz}}{F_{px}}$$

3.2.3.3. Calculul grosimii pereților la conducte și rezervoare

În calculul de dimensionare pentru grosimea pereților se consideră numai presiunea interioară dintre toate solicitările la care este supusă o conductă. În cadrul calculului de verificare se analizează răspunsul conductei de grosime determinată la grupări speciale de încărcări [14].

Pentru conductele de oțel, grosimea peretelui se determină pe baza criteriului tensiunilor admisibile și teoremei a III-a de rezistență aplicată tensiunilor produse de presiunea interioară [14]:

$$(3.8) \quad \begin{aligned} (a) \quad \sigma_a &\geq \sigma_{\max} - \sigma_{\min} = \frac{p(D_e - 2s)}{2s} - \left(-\frac{p}{2}\right) \\ (b) \quad \sigma_a &= \frac{p(D_e - s)}{2s}, \text{ sau } (c) \quad \sigma_a = \frac{p D_e}{2s} \end{aligned}$$

iar în calculele de predimensionare

$$(3.9) \quad s = \frac{p \cdot D_e}{2 \varphi \sigma_a},$$

unde σ_a este tensiunea admisibilă, în N/mm^2 ; $\sigma_{\max}$ și $\sigma_{\min}$ - valorile maxime, respectiv minime ale principalelor tensiuni, în N/mm^2 ; p - valoarea presiunii interioare, în MPa ; D_e - diametrul exterior al conductei, în mm ; s - grosimea peretelui conductei, în mm , φ - coeficient de slăbire (valori curente de 1,0...0,75). Relația (3.8.b) este pretabilă în situația unei grosimi $s \ll D_e$.

Grosimea de proiectare, s , a peretelui conductei se admite ca fiind grosimea unui element de conductă, stabilită astfel încât să satisfacă toate cerințele funcționale impuse. Relația de calcul are forma:

$$(3.10) \quad s = s_c + \Sigma C \text{ (mm)},$$

unde s_c este grosimea de rezistență, conform valorii presiunii interioare; ΣC - adaosuri de grosime în funcție de condițiile de funcționare.

Calculul grosimii s se diferențiază după poziția elementului de perete în ansamblul conductei, astfel: perete în tronsoane curente drepte și perete în tronsoane de cot și ramificații. Pentru tronsoane drepte de conductă, relația (3.10) devine [14]:

$$(3.11) \quad s = s_c + C_1 + C_2 \text{ (mm)},$$

unde C_1 este adaosul de grosime care ține cont de toleranțele negative de fabricație; C_2 - adaosul de grosime, care ține cont de coroziunea interioară sau exterioară a țevii. În general, se admite $C_2 = 0...2 \text{ mm}$, în funcție de tipul oțelului, calitatea fluidului vehiculat, locul de amplasare a elementului de conductă etc. În funcție de tehnologia de execuție, coturile pot prezenta o grosime constantă la interior și la exterior pe toată lungimea (cazul coturilor turnate). De asemenea, coturile pot prezenta grosimi diferite la exterior și interior, determinate de tehnologia de fabricație (la exterior se poate subția grosimea datorită îndoirii materialului).

Normele ISCIR prevăd pentru dimensionarea grosimii peretelui conductei expresiile:

$$(3.12) \quad s_c = \frac{D_i p_c}{2 \sigma_a z - p_c} = \frac{D_e p_c}{2 \sigma_a z + p_c},$$

iar pentru verificare

$$(3.13) \quad p_M = \frac{2 \sigma_a s_v z}{d_i - s_v},$$

$$\text{în condiția} \quad \frac{s_c}{D_i} \leq 0,10 \quad \text{sau} \quad \frac{D_e}{D_i} \leq 112,$$

unde s_v este grosimea de verificare; D_i - diametrul interior; p_c , p_M - presiunea de calcul, respectiv presiunea maximă în Mpa ; z - coeficient de rezistență al îmbinării sudate.

Valorile de calcul a tensiunii admisibile pentru oțelurile folosite la țevi, în cazul unei temperaturi medii a apei de 20°C , sunt următoarele: OL 37 - 135 N/mm^2 ; OL 44.2 - $179,2 \text{ N/mm}^2$; OL 52.2 - $212,5 \text{ N/mm}^2$.

Coeficientul z , care ia în considerație modul de îmbinare prin sudură, prezintă următoarele valori:

- conductă trasă, $z = 1$;
- îmbinare cap la cap, executată automat pe ambele fețe, sau pe o singură, față cu completare la rădăcină, $z = 0,8...1,0$;

- îmbinare cap la cap, executată manual pe ambele fețe, sau pe o singură față, cu completare la rădăcină, $z = 0,70...0,95$;
- îmbinare cap la cap, executată numai pe o față, fără inel sau placă suport, $z = 0,6$;
- îmbinări în formă de T, sau alte îmbinări la colț, cu pătrundere completă din ambele părți, $z = 0,7$;
- îmbinări în formă de T, sau alte îmbinări la colț, cu pătrundere pe o singură parte, $z = 0,6$;
- îmbinare cap la cap, executată numai pe o față, cu inel sau placă suport la rădăcină, $z = 0,7...0,9$.

Grosimea suplimentară, $\Sigma C = C_1 + C_r$, ia în considerare evoluția în timp a conductei și adaptarea acesteia la diametrele uzinale. C_1 reprezintă grosimea necesară pentru a ține cont de eroziunea și coroziunea conductei în perioada de exploatare. C_2 reprezintă adaosul care ține cont de valoarea grosimii standardizate imediat superioare valorii $s_c + C_1$ și de abaterile negative la grosimile de fabricație ale țevelor. Pentru evaluarea grosimii suplimentare C_r se ia în considerare abaterea grosimii la perete (ex. la țevele din oțel pentru instalații, conform STAS 404/2 - 80, pentru $s < 15$ mm abaterea este de 12,5 %).

În funcție de raportul dintre diametrul exterior și cel interior se apreciază calitativ grosimea peretelui conductei. Astfel:

- pentru $D_e/D_i \leq 1,10$, conducta se consideră cu pereți subțiri;
- pentru $D_e/D_i > 1,10$, conducta se consideră cu pereți groși.

3.2.4. Calculul pierderilor de sarcină

3.2.4.1. Clasificarea pierderilor de sarcină

Lucrul mecanic rezistiv, datorat rezistențelor vâscoase și turbulente ale fluidelor reale aflate în mișcare, reprezintă pierderile de energie (disipațiile de energie), sau de sarcină hidraulică h_r . Pierderile de sarcină se clasifică astfel:

- **pierderi de sarcină distribuite sau liniare** - h_d , care sunt reprezentate de disipațiile de energie în lungul curentului de fluid și sunt proporționale, în principal, cu lungimea curentului;

- **pierderi de sarcină locală sau concentrate** - h_l , care sunt reprezentate de disipații locale (pe lungimi reduse de curent) datorită variației mărimii sau direcției vitezei, sau acțiunii conjugate a acestora; pierderile de acest tip sunt produse de singularitățile curentului de lichid.

Conform principiului de compunere a pierderilor de sarcină, se admite următoarea relație generală de calcul:

$$(3.14) \quad h_r = h_d + \sum_{i=1}^n h_{l,i}$$

Pierdere de presiune se determină cu relațiile:

$$(3.15) \quad \begin{aligned} \Delta p &= \rho g h_r \\ \Delta p &= \rho g h_d + \rho g h_l' \end{aligned}$$

unde densitatea ρ corespunde naturii fluidului considerat.

Când nu poate fi aplicat principiul suprapunerii pierderilor, în calcul se va folosi un coeficient de rezistență global, determinat pentru ansamblul de tuburi, fittinguri și armături îmbinate [9].

Pentru calculul conductelor instalațiilor hidraulice, aferente rezervorului și stației de pompare, relația (3.14) se folosește sub următoarele forme:

$$(3.16) \quad \begin{aligned} (a) \quad h_r &= 0,0826 \left(\frac{\lambda_i L_i}{D_i^5} + \frac{\sum \zeta_i}{D_i^4} \right) Q^2 \\ (b) \quad h_r &= M \cdot Q^2, \\ (c) \quad h_r &= (M_d + M_l) \cdot Q^2, \\ (d.1) \quad M &= M_d + M_l + M_{\alpha 2} - M_{\alpha 1}, \\ (d.2) \quad M &= M_d + M_l \\ (e) \quad h_d &= M_d \cdot Q^2, \\ (f) \quad M_d &= 0,0826 \frac{\lambda_i L_i}{D_i^5}, \end{aligned}$$

$$(g) \quad h_l = M_l \cdot Q^2,$$

$$(h) \quad M_l = 0,0826 \frac{\sum \zeta_i}{D_i^4}$$

unde M este modulul de rezistență total al elementului de instalație calculat;

M_d - modulul de rezistență distribuit;

M_l - modulul de rezistență local;

$M_{\alpha 1,2}$ - modulul termenilor cinetici din secțiunile de calcul;

λ - coeficientul de rezistență distribuit (liniară);

ζ - coeficientul de rezistență locală; D - diametrul interior al conductei;

L - lungimea de calcul a conductei.

În cazul conductelor hidraulic scurte se aplică relația (3.16.d.1). La conductele lungi, unde se neglijează termenii cinetici, se va aplica relația (3.16.d.2).

3.2.4.2. Calculul pierderii de sarcină distribuită

Pierderea de sarcină distribuită se determină cu relația generală Darcy:

$$(3.17) \quad h_d = \lambda \frac{L}{D} \cdot \frac{v^2}{2g},$$

unde v este viteza medie pe secțiunea de calcul.

Pentru secțiuni de curgere cu forme geometrice diferite de cea circulară se folosește în locul diametrului D raza hidraulică R . Relația (3.17) poate fi transpusă în relația (3.16.e).

În funcție de panta hidraulică J (pierderea de sarcină unitară liniară), relația (3.16) devine:

$$(3.18) \quad h_d = J \cdot L.$$

Calculul pierderilor de sarcină distribuite se poate efectua în cazul conductelor lungi cu ajutorul modulului de debit K și rezistenței specifice s_0 . În funcție de rugozitatea absolută echivalentă k_e și diametrul D rezultă relațiile:

$$(3.19) \quad (a) \quad h_d = \frac{L}{K^2} Q^2$$

$$(b) \quad h_d = L \cdot s_0 \cdot Q^2,$$

unde valorile $K = f(D, k_e)$ sunt redată în Anexa 3.11.

Relațiile de calcul pentru pierderile de sarcină totale, distribuite și locale se particularizează după regimul de curgere, respectiv după criteriul Reynolds.

Pentru secțiunile de formă circulară, relația de calcul pentru numărul Reynolds are forma:

$$(3.20) \quad Re = \frac{v \cdot D}{\nu},$$

iar pentru secțiuni de altă formă geometrică:

$$(3.21) \quad Re' = \frac{v \cdot R}{\nu}, \quad R = \frac{A}{P} = \frac{D}{4}.$$

Tranziția de la regimul de curgere laminar la cel turbulent se produce în secțiunile de curgere cu forma circulară pentru numere Reynolds, considerate critice și cu valori relative de $Re_{cr} = 1.800 \dots 2.700$. Pentru alte forme geometrice ale secțiunii de curgere, când se folosește raza hidraulică R , conform relației (3.21), rezultă $Re'_{cr} = 800 \dots 900$ [9].

Coeficientul λ ($Re, k/D$) se exprimă în funcție de regimul de curgere prin criteriul Re și rugozitatea relativă a conductei k/D , sau Δ/D (se folosește și rugozitatea relativă echivalentă k_e/D și Δ_e/D). Corelațiile dintre tipurile de rugozitate considerate în calcul sunt $k = 2\Delta$ și $\Delta = (0,76 \dots 1) \Delta_e$ [9].

Valorile rugozității absolute k și ale coeficientului de rugozitate n , pentru tuburile folosite în mod frecvent în instalațiile hidraulice ale rezervoarelor și aferente acestuia, sunt redată în Anexa 3.1 și 3.2.

Pentru determinarea valorilor corecte ale rugozității absolute echivalente trebuie luate în considerare condițiile de exploatare și

calitatea apei; relația de calcul în acest caz prezintă următoarea formă [14]:

$$(3.22) \quad k_t = k_0 + \alpha \cdot t,$$

unde k_t este valoarea rugozității după o perioadă de exploatare " t ", în ani; k_0 - rugozitatea inițială.

Coeficientul α caracterizează viteza de creștere a rugozității în timp, cu valori măsurate în mm/an (tabel 3.2).

Tabel 3.2. Valorile parametrului α în relația (3.22)

Acțiunea Corosivă	Caracteristica apei Diametrul conductei	α , mm/an
Slabă	Ape necorozive slab mineralizate; ape cu conținut de redus de substanțe organice și compuși dizolvați ai fierului; $d = 150 \dots 300$ mm.	0,005- 0,055 (0,025)
Medie	Ape necorozive slab mineralizate; ape care conțin substanțe organice și compuși dizolvați ai fierului, mai puțin de 3 mg/l; $d = 150 \dots 600$ mm.	0,055- 0,18 (0,07)
Importantă	Ape destul de corozive, cu compuși dizolvați ai fierului peste 30 mg/l, dar cu un conținut redus de cloruri și sulfatii; $d = 150 \dots 600$ mm.	0,18 - 0,40 (0,20)
Puternică	Ape corozive, cu conținut mare de cloruri și sulfatii (peste 500 – 700 mg/l); ape netratate cu un conținut mare de substanțe organice; $d = 150 \dots 600$ mm	0,40 - 0,60 (0,51)
Foarte Puternică	Ape cu conținut important de carbonați și cu duritate permanentă redusă, cu un reziduu dens de peste 2000 mg/l; ape puternic mineralizate și corozive; $d = 150 \dots 600$ mm.	0,60 - 3,0
Obs.	Valorile parametrului α cresc cu reducerea diametrului. În paranteze sunt date valorile medii.	

Coeficientul λ se calculează cu relații de tip semiempiric și empiric, diferențiate după regimul de curgere (laminar, turbulent).

De asemenea, diferențierea continuă și pentru zonele regimului turbulent: hidraulic neted, tranziție și rugos.

Pentru determinarea zonelor regimului turbulent se folosesc o serie de criterii hidraulice, dintre care cele mai utilizate sunt:

- criteriul δ - grosimea filmului laminar [6], [11]:

- criteriul Prandtl - $\frac{v_* k}{\nu}$;

- criteriul Altschul - Re_{cr} , Re_{cr}'' .

Modul de analiză în fiecare caz și relațiile de calcul sunt următoarele [2], [9]:

A - Criteriul grosimii filmului laminar δ :

$$(3.23) \quad \delta = \frac{30D}{Re\sqrt{\lambda}},$$

- zona turbulenței hidraulic netede, $\delta < k$;

- zona turbulenței de tranziție, $\delta \approx k$;

- zona turbulenței rugoase, $\delta > k$.

B - Criteriul Prandtl:

$$(3.24) \quad n_1 < \frac{v_* k}{\nu} \leq n_2;$$

- zona turbulenței hidraulic netede, $5 < \frac{v_* k}{\nu}$;

- zona turbulenței de tranziție, $5 < \frac{v_* k}{\nu} \leq 70$;

- zona turbulenței rugoase, $\frac{v_* k}{\nu} > 70$.

C - Criteriul Altschul:

$$(3.25) \quad Re'_{cr} = \frac{23 D}{k}$$

$$Re''_{cr} = \frac{560 D}{k}$$

- zona turbulenței hidraulic netede, $Re'_{cr} < Re$;
- zona turbulenței de tranziție, $Re'_{cr} < Re \leq Re''_{cr}$;
- zona turbulenței rugoase, $Re''_{cr} > Re$.

O serie de relațiile pentru calculul coeficientului de rezistență distribuită λ sunt prezentate în tabelele 3.3 și 3.4. Pentru calcule de proiectare și verificare se pot folosi și graficele prezentate în Anexa 3.

Tabel 3.3. Relații de calcul pentru coeficientul de rezistență liniară λ

Nr. pot	Autor	Regim de curgere. Relația de calcul	Observații
Laminar			
1	Hagen, Poiseuille,	$\lambda = \frac{64}{Re}$	$Re < Re_{cr}$ $Re_{cr} \approx 2320$
Zona turbulentă hidraulică netedă $k < \delta$, $Re < \dots$			
2	Blasius	$\lambda = \frac{1}{\sqrt[4]{100 Re}} = \frac{0,3164}{Re^{0,25}}$	$4000 < Re < 10^5$
3	Prandtl – Nikuradze	$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 2 \log(Re \sqrt{\lambda}) - 0,8 = 2 \log \frac{Re \sqrt{\lambda}}{2,51}$	$3000 < Re < 10^7$
4	Filonenko – Altschul	$\lambda = (1,8 \log Re - 1,64)^{-2}$	$4000 < Re < 10^7$
5	Karman	$\lambda = 0,0032 + 0,221 \cdot Re^{-0,237}$	$10^5 < Re < 3,24 \cdot 10^6$
6	Konakov	$\lambda = (1,8 \log Re - 1,5)^{-2}$	$3000 < Re < 10^7$

7	Koo	$\lambda = 0,0056 + 0,5 \cdot Re^{-0,32}$	$Re < 3 \cdot 10^6$
8	Mc.Adams	$\lambda = 0,184 Re^{-0,20}$	$5000 < Re < 2 \cdot 10^5$
9	Herman	$\lambda = 0,0054 + 0,396 \cdot Re^{-0,30}$	$10^5 < Re < 2 \cdot 10^6$
Zona turbulentă de tranziție $\delta \cong k$, $Re'_{cr} \leq Re < Re''_{cr}$			
10	Colebrook – White	$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \log \left(\frac{2,51}{Re \sqrt{\lambda}} + \frac{k}{3,71 D} \right)$	-
11	Moody	$\lambda = 0,0055 \left[1 + \left(\frac{20.000 k}{D} + \frac{10^6}{Re} \right)^{0,33} \right]$	$4000 < Re < 10^7$
12	Altschul	$\lambda = 0,11 \left(\frac{k}{D} + \frac{68}{Re} \right)^{0,25}$	-
13	Frenkel	$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \log \left[\left(\frac{6,81}{Re} \right)^{0,9} + \frac{k}{3,72 D} \right]$	-
Zona turbulentă rugoasă $\delta < k$, $Re''_{cr} < Re$,			
14	Prandtl – Nikuradze	$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 2 \log \frac{3,72 D}{k}$	$10^5 < Re < 10^8$
15	Șifrinson	$\lambda = 0,11 \left(\frac{k}{D} \right)^{0,25}$	-
16	Prandtl	$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 1,14 - 2 \log \frac{k}{D}$	-

Pierdere de sarcină liniară unitară (panta hidraulică J) se determină în funcție de natura hidraulică a conductei, exprimată prin coeficientul de rezistență λ , sau coeficientul de rugozitate n . Relația generală de calcul are forma [2], [13]:

$$(3.26) \quad (a) \quad J = \frac{x n^a v^b}{D^c}$$

$$(b) \quad J = \frac{y n^a Q^b}{D^d}$$

unde x, y sunt coeficienți, iar a, b, c, d exponenți cu valori în funcție de zona regimului turbulent și sistemele de unități de măsură.

În tabelul 3.5 sunt prezentate principalele relații de calcul ale pantei hidraulice J , iar în Anexele 3.4...3.7 sunt redată grafic corelațiile $J = f(Q, D)$ pentru conductele folosite în instalațiile hidraulice de transport a apei reci.

Tabel 3.4. Relațiile Șevelev pentru coeficientului λ ($t = 10^\circ\text{C}$)

Nr. ct	Relația de calcul.	Natura și tipul conductei
1	$\lambda = \frac{0,0159}{D^{0,226}} \left(1 + \frac{0,684}{v}\right)^{0,226}$	Conductă nouă din oțel
2	$\lambda = \frac{0,0144}{D^{0,284}} \left(1 + \frac{2,36}{v}\right)^{0,284}$	Conductă nouă din fontă
3	$\lambda = \frac{0,0179}{D^{0,3}} \left(1 + \frac{0,867}{v}\right)^{0,3}$	Conducte vechi din fontă și oțel Pentru $v < 1,2$ m/s
4	$\lambda = \frac{0,021}{D^{0,3}}$	Conducte vechi Pentru $v \geq 1,2$ m/s
5	$\lambda = \frac{0,011}{D^{0,19}} \left(1 + \frac{3,51}{v}\right)^{0,19}$	Conducte din azbociment
6	$\lambda = \frac{0,011}{D^{0,25}} \left(0,95 + \frac{0,15}{v}\right)$	Conducte din ceramică Pentru $v < 2,7$ m/s

7	$\lambda = \frac{0,0085}{D^{0,26}} \left(1 + \frac{0,235}{v}\right)$	Conducte din sticlă
8	$\lambda = \text{Re}^{-0,226}$	Conducte din mase plastice
9	$\lambda = 0,011 D^{0,25}$	Conducte cu $v \geq 2,7$ m/s

Tabel 3.5. Relații de calcul pentru panta hidraulică J (conducte circulare)

Nr. ct	Relația de calcul.	Natura și tipul conductei
1	$J = 8,61 \cdot 10^{-3} \cdot v^{1,92} \cdot D^{-1,29}$	Conductă din fontă (Hazen-Williams)
2	$J = 7,28 \cdot 10^{-3} \cdot v^{1,80} \cdot D^{-1,24}$	Conductă din azbociment (Hazen-Williams)
3	$J = 7,52 \cdot 10^{-3} \cdot v^{1,85} \cdot D^{-1,26}$	Conducte din beton (Hazen-Williams)
4	$J = 91 \cdot 10^{-5} \frac{Q^2}{D^{5,19}} \left(1 + \frac{2,76 \cdot D^2}{Q}\right)^{0,19}$	Conducte din azbociment (Șevelev)
5	$J = \frac{0,00148}{D^{5,3}} \left(1 + \frac{0,688 \cdot D^2}{Q}\right)^{0,3} Q^2$	Conducte vechi din fontă și oțel $v < 1,2$ m/s (Șevelev)
6	$J = 0,001736 \cdot Q^2 \cdot D^{-5,3}$	Conducte metalice $v \geq 1,2$ m/s (Șevelev)

3.2.4.3. Calculul pierderilor de sarcină locală

Pierderile de sarcină locală se determină cu relația generală [9]:

$$(3.27) \quad h_{\ell} = \zeta \frac{v^2}{2g},$$

în care ζ reprezintă **coeficientul de rezistență locală**, iar v este viteza măsurată în aval de elementul perturbator.

Coeficienții de rezistență locală ζ sunt mărimi adimensionale, în cea mai mare parte determinați pe cale experimentală și care depind de caracteristicile geometrice și hidraulice ale singularităților.

Pentru cazul general al mișcării turbulente, coeficientul de rezistență locală este definit de funcția [9], [11]:

$$(3.28) \quad \zeta = f(\text{Re}, k_e/D, c_1, c_2, \theta^0, \dots),$$

care în zona turbulenței hidraulic netede, unde rugozitatea nu intervine preponderent în definirea fenomenului, devine:

$$(3.29) \quad \zeta = f(\text{Re}, c_1, c_2, \theta^0, \dots).$$

În relațiile (3.28) și (3.29), raportul k_e/D reprezintă rugozitatea relativă, $c_1, c_2, \dots$ - parametrii constructivi și funcționali, θ^0 - unghi caracteristic etc.

În calculul hidraulic al pierderilor de sarcină locală poate fi folosit și principiul "**lungimii echivalente, l_e** ". Acesta constă în echivalarea pierderii de sarcină locală produsă de o singularitate, cu cea liniară, corespunzătoare unei conducte drepte cu o lungime echivalentă l_e și care are același diametru D . Ecuația de echivalență este următoarea:

$$(3.30) \quad l_e = \frac{\zeta}{\lambda} \cdot D,$$

care este aplicabilă mai mult în zona turbulenței rugoase, unde $\zeta = \text{const.}$ Prin utilizarea relației (3.30) în ecuația (3.14) se obține:

$$(3.31) \quad h_r = h_d + \sum_{i=1}^n h_{l,i} = \frac{v^2}{2g} \left(\frac{\lambda L}{D} + \zeta \right) = \frac{\lambda L_e}{D} \frac{v^2}{2g},$$

de unde rezultă lungimea echivalentă a conductei cu pierderi de sarcină distribuite și locale,

$$(3.32) \quad L_e = L + l_e = L + \frac{D}{\lambda} \zeta.$$

Coeficientul de rezistență locală se determină prin folosirea relațiilor speciale de calcul pentru fiecare tip de singularitate. În cazul unor relații complexe ca structură și cu o rezolvare analitică dificilă se indică utilizarea graficelor și nomogramelor întocmite pe domenii de numere Reynolds. Pentru numere Reynolds mari, unde sunt întrunite pe deplin condițiile de realizare a "**domeniului de**

automodelare Reynolds", coeficientul ζ tinde spre o valoare constantă și care sunt, în general, prezentate tabelar.

Pentru elementele componente ale instalațiilor hidraulice aferente rezervoarelor, principalii coeficienți de rezistență locală sunt definiți de relațiile [3], [5], [8], [9], [11] etc:

A - Intrarea într-un rezervor de dimensiuni mari:

$$(3.33) \quad h_l = \zeta \frac{\alpha v^2}{2g},$$

unde coeficientul $\zeta \cong 1$, iar coeficientul lui Coriolis α are valorile specifice regimului de curgere.

B - Coturi netede fără sudură. Pentru diametre mai mici de 250 - 300 mm la tuburile din metal, în general, se utilizează coturi turnate, coturi trase pe dorn, etc și mai puțin coturi confecționate din elemente sudate.

Coeficientul de rezistență este considerat a fi de tip total, ζ_t , conform relației:

$$(3.34) \quad \zeta_t = \zeta_d + \zeta_l$$

unde ζ_d este coeficientul de rezistență distribuită în conducta dreaptă cu diametrul interior egal cu cel al cotului ($\zeta_d = \lambda L / D$), iar ζ_l - coeficientul de rezistență al cotului datorită modificării locale a condițiilor de curgere.

Valorile coeficientului de rezistență locală ζ_t pentru coturile netede se determină cu relația generală:

$$(3.35) \quad \zeta_t = \zeta_0 \cdot \zeta_1 \cdot \zeta_2,$$

unde ζ_0 este o funcție de numărul Reynolds, ζ_1 - depinde de raportul R/d , R - raza de curbura, ζ_2 - depinde de unghiul δ^0 (fig. 3.13). Valorile coeficienților ζ_i sunt prezentate în tabelul 3.6.

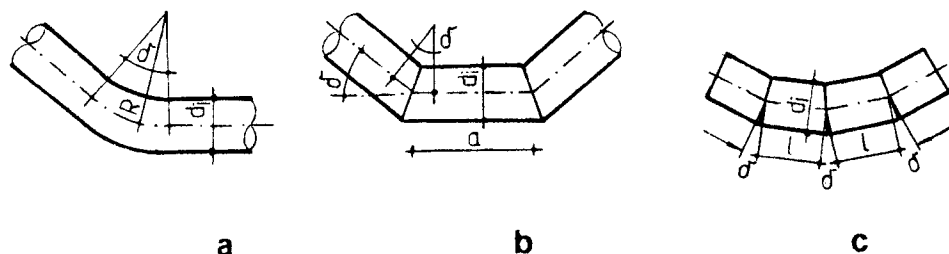


Fig. 3.13. Schema coturilor trase (a) și coturilor din segmente (b,c).

Tabel 3.6. Valorile coeficienților ζ_i din relația (3.35)Coeficientul ζ_0

Re	$2 \cdot 10^4$	$4 \cdot 10^4$	$6 \cdot 10^4$	$8 \cdot 10^4$	10^5	$2 \cdot 10^5$	$3,8 \cdot 10^5$	$5 \cdot 10^5$	$\geq 7 \cdot 10^5$
ζ_0	2,0	1,5	1,4	1,3	1,25	1,12	1,08	1,0	0,9

Coeficientul ζ_1

R/d	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,25
ζ_1	1,1	0,73	0,47	0,32	0,23	0,19	0,155
R/d	1,5	2,0	2,5	3,0	10	15	20
ζ_1	0,135	0,118	0,105	0,10	0,06	0,045	0,04

Coeficientul ζ_2

δ	20°	40°	60°	80°	90°	100°	120°	140°	160°	180°
ζ_2	0,34	0,6	0,8	0,93	1	1,07	1,117	1,125	1,33	1,4

Pentru coturi trase, ecuația (3.35) se poate explicita sub forma [10], [1]:

$$(3.36) \quad \zeta_t = \left[0,13 + 0,16 \left(\frac{d}{R} \right)^{3,5} \right] \left(\frac{\delta}{90} \right),$$

sau

$$(3.37) \quad \zeta_t = \alpha \zeta_{90^\circ} \text{ cu } \zeta_{90^\circ} = \left[0,2 + 0,001(100\lambda)^8 \right] \sqrt{\frac{d}{R}},$$

unde parametrul α este prezentat în tabelul 3.7.

Tabel 3.7. Parametrul $\alpha = f(\delta)$ din relația (3.37)

δ	20°	30°	40°	50°	60°	70°	80°
α	0,40	0,55	0,65	0,75	0,83	0,88	0,95
δ	90°	100°	120°	140°	160°	180°	-
α	1,0	1,05	1,13	1,20	1,27	1,33	-

C - Coturi sudate din segmente. Coturile formate din segmente sudate se folosesc, în general, pentru diametre mai mari de 250 mm. Acestea sunt executate din 1...3 segmente de centru, în funcție de mărimea unghiului δ și câte o jumătate de segment la fiecare margine. Pierderea de sarcină are o valoare mult mai mare, datorită desprinderii curentului de lichid de peretele cotului și rugozității majorate prin prezența cordoanelor de sudură.

Pentru un cot format din îmbinarea a două segmente (fig. 3.13.c), coeficientul de rezistență locală ζ_c se poate calcula cu relația lui Weisbach [9]:

$$(3.38) \quad \zeta_c = 0,946 \sin^2 \left(\frac{\delta}{2} \right) + 2,47 \sin^4 \left(\frac{\delta}{2} \right),$$

unde unghiul δ se exprimă în grade. Pentru coturi formate din mai multe segmente (netede, respectiv rugoase), coeficientul ζ_c depinde de parametrii: n - numărul de segmente, δ - unghiul dintre segmente, l/d - raportul dintre lungimea segmentului și diametrul tronsonului de conductă. Valorile de calcul pentru coeficienții ζ_c sunt redată în Anexa 3.12.

D - Intrarea în conductă dintr-un rezervor. Coeficientul de rezistență depinde de modul în care este profilată intrarea în conductă, diametrul interior al conductei (D), avansul conductei în rezervor (l), unghiul de înclinare al conductei față de peretele rezervorului (θ), grosimea peretelui conductei (e) etc.

Valorile uzuale ale coeficienților ζ_i pot fi calculate cu datele din Anexa 3.13.a (intrare dreaptă) și b (intrare teșită). În calcule de verificare pot fi folosite următoarele valori (fig. 3.14):

- intrare cu muchie ascuțită, $\zeta_i = 0,5$;
- intrare profilată cu raza r , $\zeta_i = 0,20 \dots 0,05$;

- intrare sub unghi θ , conform relației de calcul

$$(3.39) \quad \zeta_i = 0,5 + 0,3\cos\theta + 0,2\cos^2\theta.$$

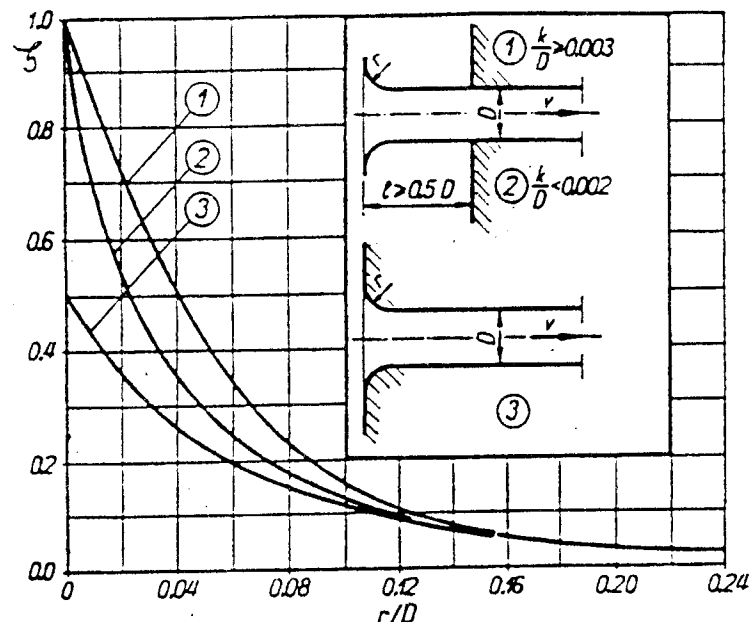


Fig. 3.14. Coeficientul de rezistență ζ_i la intrarea apei din rezervor într-o conductă.

E - Modificarea secțiunii de curgere. Schimbarea diametrului, sau mărimilor ce caracterizează secțiunea de curgere a conductei, determină modificarea ariei vii a curentului de fluid și implicit, induce o variație a vitezei, cu influențe asupra bilanțului energetic. Schimbarea diametrului se poate realiza în mod brusc, sau continuu, prin folosirea unei piese speciale care dirijează liniile de curent. Modul de schimbare are o influență directă asupra valorii pierderilor de sarcină.

Relațiile de calcul și valorile coeficienților de rezistență locală sunt următoarele:

- pentru o îngustare bruscă de secțiune (fig. 3.15.a), de la aria A_0 la aria A_1 , unde $A_0 > A_1$ [1]:

$$(3.40) \quad \zeta_{i,b} = \left(\frac{1}{\varepsilon} - 1 \right)^2, \quad \varepsilon = 0,57 + \frac{0,043}{1,1 - \frac{A_0}{A_1}};$$

- pentru o lărgire bruscă de secțiune (fig. 3.15.b), de la A_1 la A_0 , unde $A_1 < A_0$, se folosește relația lui Borda:

$$(3.41) \quad \zeta_l = \left(1 - \frac{A_1}{A_0} \right)^2;$$

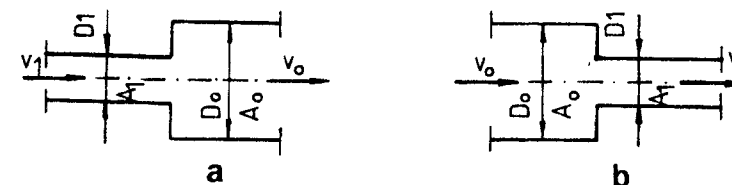


Fig. 3.15. Schema lărgirii (a) și îngustării (b) bruște de secțiune

- pentru o mărire continuă de secțiune, tip difuzor (fig. 3.16, tabel 3.8), relația de calcul a coeficientului $\zeta_d = f(\theta, d_1/d_2)$ are forma:

$$(3.42) \quad \zeta_d = a \left(\frac{A_2}{A_1} - 1 \right)^2,$$

unde coeficientul a depinde de unghiul θ , iar valorile de calcul fiind $a = 0,20 \dots 0,12$; valoarea optimă a unghiului θ , la care vâna de fluid nu se desprinde de perete, este de $7 - 8^\circ$, pentru o lungime a difuzorului $L_d = (4 \dots 5) (d_1 - d_2)$; valoarea maximă admisă este $\theta = 12^\circ$;

- pentru o reducere continuă de secțiune, sub forma unui confuzor cu unghiul θ (fig. 3.17 și tabel 3.9), pentru calculul coeficientului de rezistență $\zeta_c = f(\theta, d_1/d_2)$ se folosește relația:

$$(3.43) \quad \zeta_{i,b} = K_c \left(\frac{1}{\varepsilon} - 1 \right)^2,$$

unde parametrul $K_c = 0,2 \dots 0,4$ după cum $\theta = 60 \dots 10^\circ$, iar coeficientul ε se calculează conform relației (3.40); lungimea confuzorului poate fi scurtă, respectiv $L_c = 2(d_1 - d_2) + 150 \text{ mm}$, sau se calculează din condițiile geometrice impuse de montajul în cadrul instalației;

Tabel 3.8. Valorile coeficienților $\zeta = f(\theta, d_1/d_2)$ la difuzor

d_2/d_1	ζ_d			
	4-8°	12°	16°	20°
1,2	0,04	0,07	0,09	0,12
1,4	0,10	0,20	0,30	0,40
1,6	0,30	0,50	0,70	1,00
1,8	0,70	1,20	1,50	2,10
2,0	1,30	2,00	2,60	3,60

Fig.3.16. Difuzor

 Tabel 3.9. Valorile coeficienților $\zeta = f(\theta, d_1/d_2)$ la confuzor

D_2/d_1	ζ_c		
	3°	5°	10°
0,64	0,072	0,067	0,054
0,45	0,076	0,064	0,052
0,39	0,098	0,070	0,051
0,25	0,100	0,071	0,047
0,16	0,108	0,084	0,048

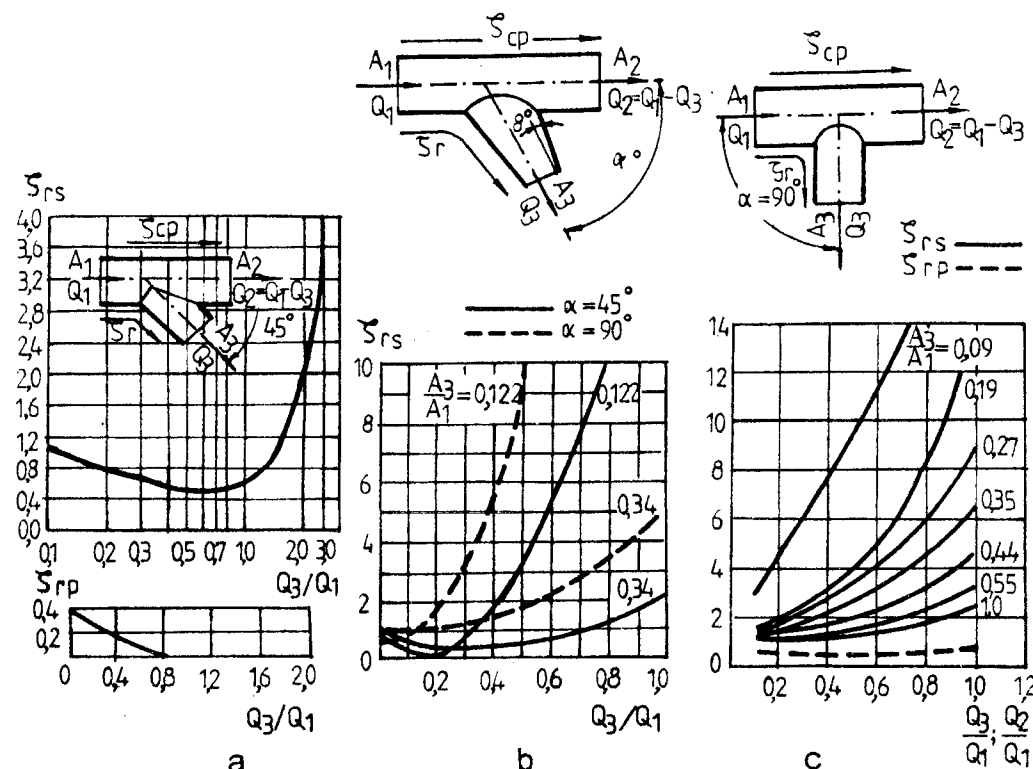
Fig.3.17. Confuzor

F - Ramificații. Ramificațiile sau derivațiile, existente în instalațiile hidraulice, sunt elemente de îmbinare executate prin turnare sau sudură, în funcție de mărimea diametrului conductei. Rolul acestora este de a distribui curentul de fluid (ramificații de separație), respectiv de a îmbina curenții (ramificații de confluență). Ramificațiile pot avea ramurile cu diametre constante sau variabile. Ramurile pot fi dispuse sub unghiuri egale sau diferite. De asemenea, ramificațiile pot prezenta axele în același plan sau în plane diferite etc. Ramificațiile, care sunt realizate în unghi drept, se numesc teuri.

Coeficientul de rezistență ζ_r depinde de schema de circulație a fluidului, raportul dintre debite sau viteze, unghiul de derivație sau confluență α și de raportul diametrelor în cazul variației secțiunii de curgere [5], [9]. O ramificație prezintă doi coeficienți de rezistență;

- coeficientul de rezistență pe conducta principală (curentul care se distribuie, sau cel care adună) - ζ_{rp} ;

- coeficientul de rezistență pe conducta secundară (curentul


 Fig.3.18. Coeficienții de rezistență locală ζ_{rp} și ζ_{rs} la ramificațiile de separație: a - $\alpha = 45^\circ$; b - $\alpha = 45^\circ$ și $\alpha = 90^\circ$; c - $\alpha = 90^\circ$.

Valorile de calcul ale coeficienților ζ_{rp} și ζ_{rs} sunt prezentate în figurile 3.18, 3.19 și 3.20 pentru diverse modalități de realizare a ramificațiilor și situații specifice de funcționare (confluență, separație).

G - Sorburi. Coeficienții de rezistență, ζ_s , pentru sorbul utilizat la conductele de aspirație a pompelor, sau la conductele care preiau gravitațional apa din rezervor, depind de diametrul și modul de realizare constructiv al acestora.

Sorburi pot fi realizate cu clapet de reținere (numai la conductele de aspirație cu $D < 600$ mm), grătar (Fig.3.21.a și b) etc. Valoarea coeficientului ζ_s rezultă în mod direct din graficele de calcul, în funcție de diametrul conductei de aspirație și tipul constructiv al sorbului.

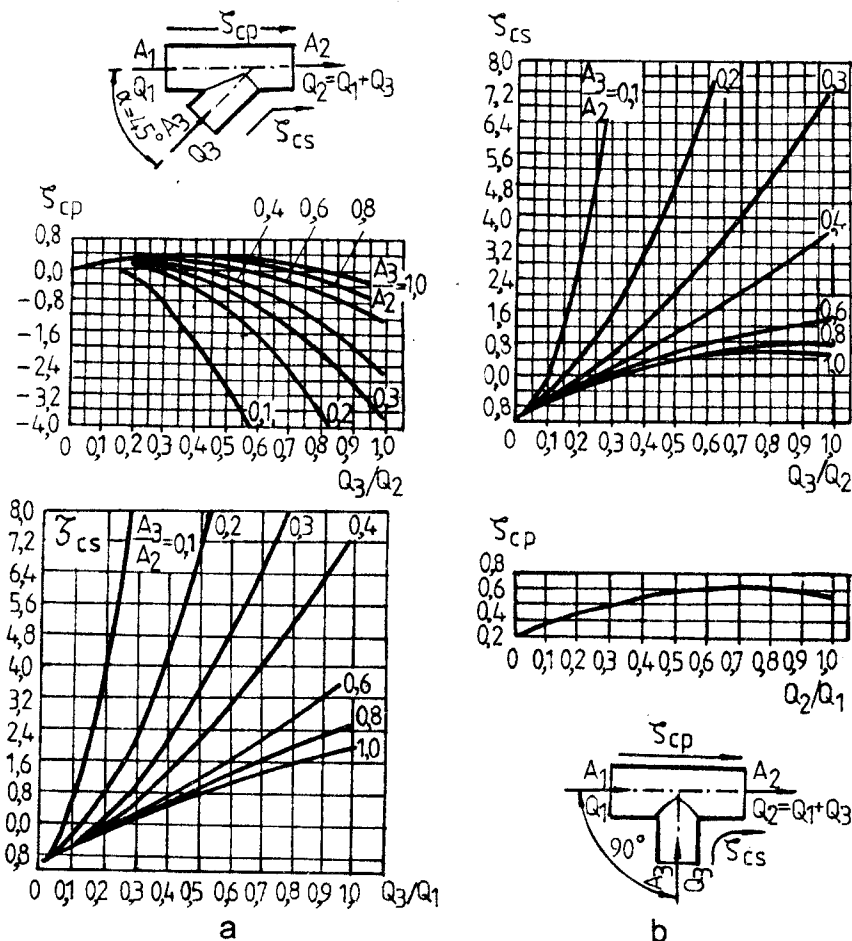


Fig. 3.19. Coeficienții de rezistență locală ζ_{rp} și ζ_{rs} la ramificațiile de confluență: a - $\alpha = 45^\circ$; b - $\alpha = 90^\circ$.

H – Clapeți de reținere. Coeficienții de rezistență locală la clapeți, ζ_{cl} , se determină pentru poziția deschis a acestora, în funcție de diametrul specific D . Valorile de calcul, în funcție de tipul clapetului și diametrul conductei, se obțin cu ajutorul graficului din figura 3.22.

I – Robineți și vane. Valoarea coeficientului de rezistență locală ζ_v depinde de tipul constructiv al robinetului și caracteristicile geometrice ale secțiunii de curgere. Parametrii principali ai secțiunii de curgere sunt: a/D - gradul de deschidere la

robinetii sertar, unghiul θ și raportul t/D la robinetii fluture (t este grosimea discului) etc.

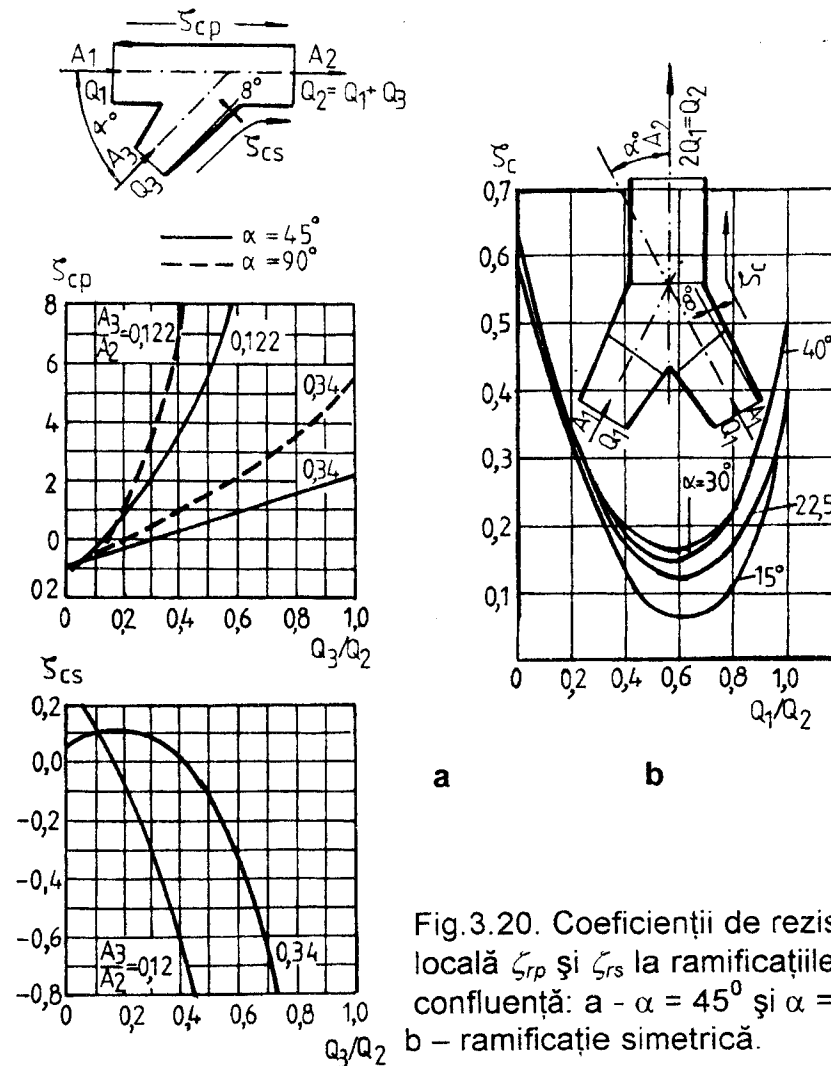


Fig. 3.20. Coeficienții de rezistență locală ζ_{rp} și ζ_{rs} la ramificațiile de confluență: a - $\alpha = 45^\circ$ și $\alpha = 90^\circ$; b - ramificație simetrică.

În Anexa 3.14 este reprezentată variația coeficientului ζ_v la un robinet tip sertar în funcție de gradul de deschidere.

În Anexa 3.15 este reprezentată variația coeficientului ζ_f pentru un robinet tip fluture în funcție de unghiul θ .

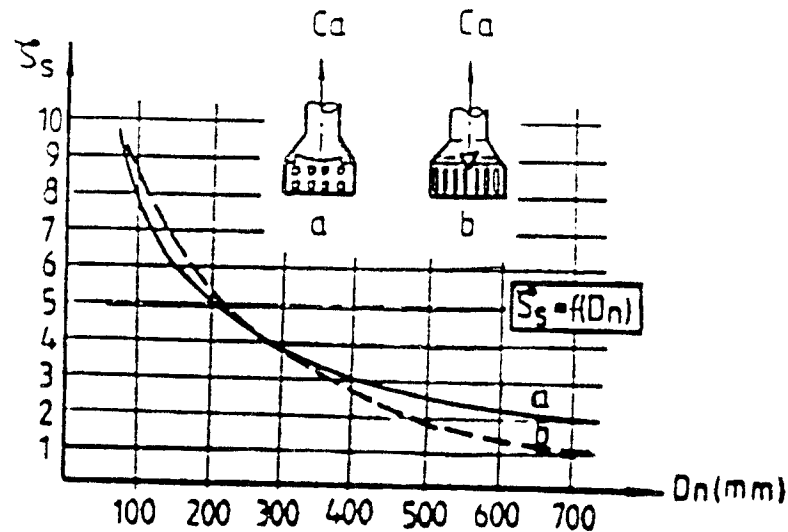


Fig. 3.21. Coeficienții ζ_s la sorb cu clapet (a) și grătar (b).

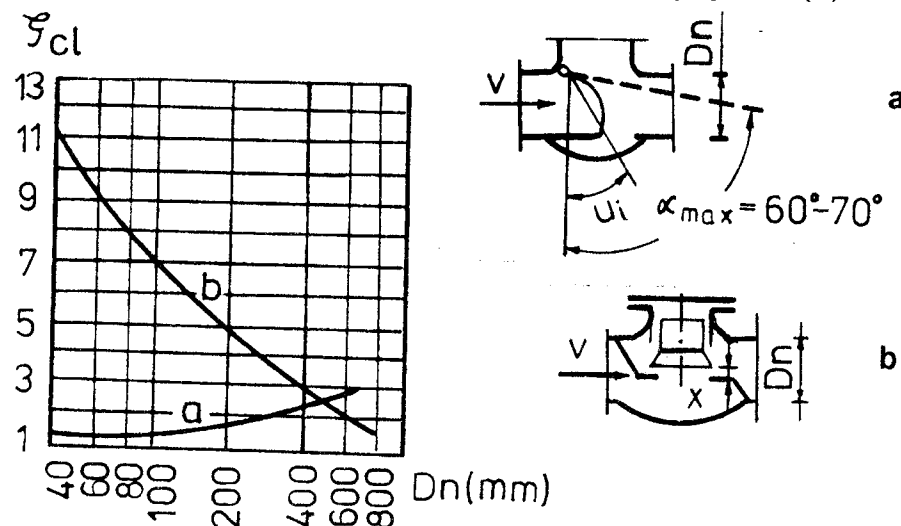


Fig. 3.22. Coeficientul ζ_{cl} la clapete de reținere cu valvă (a) și ventil (b).

Valorile de calcul ale coeficienților de rezistență locală pentru singularitățile sistemului hidraulic trebuie alese cu o deosebită atenție avînd în vedere diversitatea constructivă a acestora, chiar pentru același tip. Se recomandă în acest caz, utilizarea valorilor indicate în prospectele firmelor producătoare de armături hidraulice.

3.3. CALCULUL HIDRAULIC AL CONDUCTELOR

3.3.1. Relații generale și modele de calcul

Conductele, armăturile și rezervoarele care alcătuiesc un ansamblu tehnic destinat transportului și înmagazinării apei, sau fluidelor tehnologice, constituie un sistem hidraulic. Pentru situațiile curente de calcul, mișcarea apei în sistemul hidraulic se admite, pe intervale relativ scurte de timp, a fi de tip permanent.

La calculul mișcării permanente sub presiune a fluidelor incompresibile ($\rho = \text{const}$) și izoterme sunt folosite ecuațiile generale ale hidraulicii, particularizate pentru acest caz:

a - *ecuația de continuitate* pentru modelul curentului unidimensional de fluid, definită sub forma:

$$(3.44) \quad Q = vA = \text{const.}$$

în care v este viteza medie corespunzătoare ariei vii , A , a secțiunii de curgere.

b - *legea energiilor (Bernoulli)*, care aplicată între două secțiuni (1-1) și (2-2) de-a lungul curentului de fluid aflat în mișcare, conform modelului unidimensional de fluid, are forma:

$$(3.45) \quad \left(z + \frac{p}{\rho g} \right)_1 + \frac{\alpha_1 v_1^2}{2g} = \left(z + \frac{p}{\rho g} \right)_2 + \frac{\alpha_2 v_2^2}{2g} + h_{r1-2},$$

cu următoarele reprezentări geometrice și interpretări energetice:

- z este cota de poziție, respectiv energia specifică medie de poziție (formă a energiei potențiale);

- $\frac{p}{\rho g}$ este cota de presiune, respectiv energia specifică medie de presiune (energie potențială);

- $\left(z + \frac{p}{\rho g} \right) = H_p$ este cota piezometrică, respectiv energia specifică medie potențială;

- $\frac{\alpha v^2}{2g}$ este înălțimea cinetică, respectiv energia specifică medie cinetică; α - coeficientul lui Coriolis, cu valori în funcție de regimul hidraulic de mișcare;

- h_{r1-2} este pierderea totală de sarcină hidraulică produsă pe lungimea sistemului între secțiunile de calcul (1-1) și (2-2); pe aceiași lungime, $\Delta p = \gamma \cdot h_{r1-2}$ este pierderea de presiune;

c - *teorema impulsului* exprimată sub forma:

$$(3.46) \quad \rho(Q\vec{v})_e - \rho(Q\vec{v})_i = \sum \vec{F}_{ex},$$

unde i este indicele secțiunii de intrare, respectiv e al secțiunii de ieșire din domeniul de fluid considerat.

Sistemele de conducte sub presiune se diferențiază în calculul hidraulic după natura și ponderea unui anumit tip de pierdere de sarcină. Se admite, în general, următoarea clasificare pentru sistemele hidraulice:

- **Sisteme locale**, la care mișcarea fluidului prezintă o mare neuniformitate, iar pierderile de sarcină distribuite pot fi neglijate în raport cu cele locale. În această categorie pot fi încadrate orificiile și ajutajele scurte.

- **Sisteme hidraulic scurte sau conducte hidraulic scurte**, la care se admite că pierderile de sarcină liniare și locale sunt relativ de același ordin de mărime; tot odată, la astfel de sisteme nu pot fi neglijate termenii cinetici din relația energiei. În această categorie sunt cuprinse majoritatea conductelor din instalația hidraulică a rezervoarelor de înmagazinare, cele din rețeaua interioară a stațiilor de pompare etc.

- **Sisteme hidraulic lungi sau conducte hidraulic lungi**, la care se admite că pierderile de sarcină liniare sunt mai mari decât cele locale, situație în care, în calculul hidraulic ultimele sunt

neglijate. De asemenea, termenii cinetici sunt neglijati datorită valorii lor reduse. În această categorie sunt incluse conductele de aducțiune și distribuție prin care rezervorul este conectat la sistemul de alimentare cu apă, precum și conductele de refulare a stațiilor de pompare, de transport, etc.

Efectuarea calculelor hidraulice specifice sistemelor de conducte, impune cunoașterea următoarelor date de bază:

- **caracteristicile de amplasament**: configurație, trasee, cote geodezice, puncte obligate, lungimi, plan de referință etc;

- **parametrii geometrici și tehnici** pentru tuburi, țevi, fittinguri și armături: tip, diametre, lungimi caracteristice, rugozități, unghiuri și curbe, caracteristicile singularităților etc;

- **parametrii hidraulici**: debite distribuite în mod uniform pe lungime sau concentrat la distanțe egale, debite totale, viteze medii, sarcini disponibile, presiuni de serviciu, presiuni maxime, pierderi de sarcină impuse, etc;

- **restricții de calcul** pentru viteze (maxime și minime), presiuni (presiuni minime de serviciu și maxime admise), amplasament, material etc;

Problemele de calcul hidraulic ale conductelor (scurte și lungi) și sistemelor de conducte se pot clasifica în două grupe:

- **probleme de proiectare**, care au ca scop calculul dimensiunilor geometrice ale secțiunilor de curgere fiind cunoscute debitul transportat, pierderea de sarcină impusă, regimul presiunilor, restricțiile de viteză etc;

- **probleme de verificare**, prin care se determină debitul transportat, viteza medie în conductă, precum și alți parametri funcționali, fiind cunoscute caracteristicile de amplasament și geometrice ale secțiunilor de curgere, sarcina disponibilă etc.

3.3.2. Calculul conductelor hidraulic scurte

Conductele hidraulic scurte pot fi realizate de tip monofilar simplu (cu diametru constant), sau monofilar compus, respectiv prin compunerea mai multor tronsoane cu caracteristici geometrice

diferite (conducte legate în serie). De asemenea, în ultima categorie sunt considerate și conductele legate în paralel.

Conducta monofilară simplă realizează, în general, un tronson din instalația hidraulică, în lungul căruia diametrul și debitul se mențin constante (fig. 3.23). Pierderile de sarcină totale între secțiunile de intrare și ieșire se obțin prin însumarea pierderilor liniare și a celor locale.

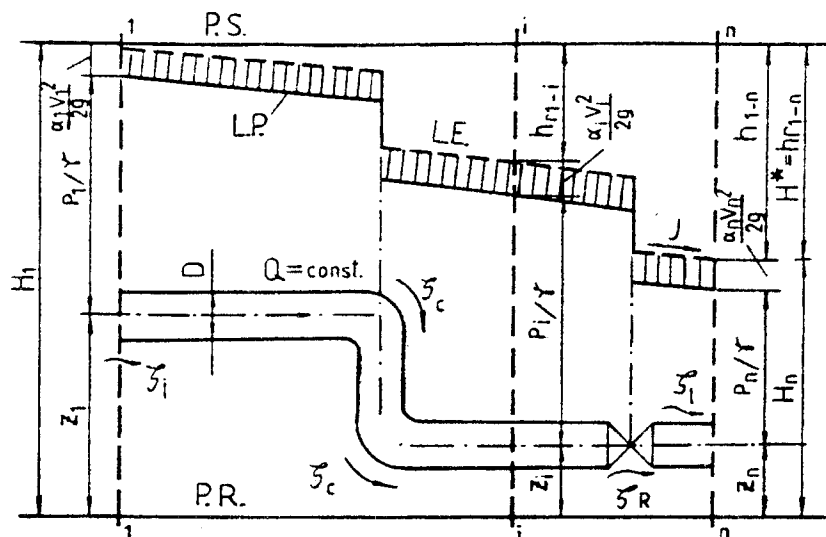


Fig. 3.23. Schema de calcul pentru conducta monofilară simplă.

Prin aplicarea ecuației energiei în două secțiuni de calcul, 1-1 și n-n, dispuse în lungul conductei, se obține relația vitezei apei la ieșirea din conductă, exprimată sub forma:

$$(3.47) \quad v = \varphi \sqrt{2gH^*},$$

unde H^* este sarcina sistemului hidraulic; φ - coeficientul de corecție al vitezei, exprimat prin relația:

$$(3.48) \quad \varphi = \frac{1}{\sqrt{\alpha_1 - \alpha_2 \left(\frac{A_1}{A_n} \right)^2 + \frac{\lambda L}{D} + \sum \zeta_i}}.$$

Când viteza v_i are o valoare redusă, al doilea termen de sub radical se poate neglija, situație în care se obține:

$$(3.49) \quad \varphi = \frac{1}{\sqrt{\alpha + \frac{\lambda L}{D} + \sum \zeta_i}}.$$

Relația (3.49) este valabilă pentru un sistem hidraulic fără viteză de acces (cazul sistemelor alimentate dintr-un rezervor sau bazine de dimensiuni mari). De asemenea, în cazul unor viteze v_i și v_n cu valori reduse, cărora le corespund termeni cinetici neglijabili, relația (3.48) devine:

$$(3.50) \quad \varphi = \frac{1}{\sqrt{\frac{\lambda L}{D} + \sum \zeta_i}} \Rightarrow \varphi = \frac{1}{\sqrt{\zeta^*}}.$$

În conformitate cu ecuația de continuitate pentru modelul unidimensional de fluid (ec.3.44), se obține ecuația caracteristică pentru conductele hidraulic scurte sub forma:

$$(3.51) \quad Q = A_n \cdot v_n \Rightarrow Q = \varphi A_n \sqrt{2gH^*},$$

unde A_n reprezintă aria vie a secțiunii finale de curgere.

Pierderea de sarcină la o conductă monofilară simplă se determină cu relația (3.14) sau relațiile (3.16 și 3.17). Modulul de rezistență se determină în acest caz cu relația (3.16.d.1).

Problema de proiectare a unui tronson de conductă, în cazul când nu se impune o valoare a vitezei v , se realizează printr-un calcul iterativ, având în vedere că diametrul D este inclus în relațiile de definire a coeficienților de rezistență distribuită λ_i și locală ζ_i . Astfel, într-o primă aproximație se admite o anumită zonă de curgere a regimului turbulent, pentru care se aproximează valorile λ_i , respectiv ζ_i ; cu aceste valori se determină coeficientul φ , viteza v și diametrul D . În iterația a doua, când se cunoaște o valoare preliminară a diametrului, se determină direct zona de curgere a regimului turbulent, pentru care se calculează coeficienții de rezistență și de viteză etc., rezultând o nouă valoare pentru

diametrul D . Iterațiile continuă până când diferența dintre două valori consecutive ale diametrului (D_i , D_{i+1}) este neglijabilă, respectiv:

$$(3.52) \quad \left| \frac{D_{i+1} - D_i}{D_{i+1}} \right| \leq \delta_D,$$

unde $\delta_D = 0,005 \dots 0,01$.

În anumite situații de calcul, determinarea diametrului se realizează în baza unor criterii economice. Pentru conductele de transport și distribuție a apei, vitezele limită și debitele economice depind de valoarea diametrului considerat. Pentru conductele de transport și distribuție din sistemele de alimentare cu apă pot fi folosite valorile din tabelul 3.10.

Tabel 3.10. Debitele economice și vitezele limită în funcție de diametrul conductelor la transportul și distribuția apei. [19]

D	mm	50	75	100	125	150	200
Q	l/s	1,5	1,5 - 3,3	3,3 - 6	6 - 10	10 - 15	15 - 30
V	m/s	0,75	0,75	0,76	0,82	0,85	0,95
D	mm	250	300	350	400	450	500
Q	l/s	30 - 50	50 - 74	74 - 106	106 - 145	145 - 190	190 - 245
V	m/s	1,02	1,05	1,10	1,15	1,20	1,25
D	mm	600	700	800	900	1000	1100
Q	l/s	245 - 365	365 - 520	520 - 705	705 - 920	920 - 1200	1200 - 1475
V	m/s	1,30	1,35	1,40	1,45	1,53	1,55

În mod asemănător se calculează problema de verificare a debitului, având în vedere nedeterminarea matematică a acesteia (coeficienții λ_i , ζ_i , și ϕ depind direct de debitul Q).

3.3.3. Calculul conductelor hidraulic lungi

3.3.3.1. Relații generale de calcul

În calculul conductelor hidraulic lungi se neglijează pierderile de sarcină locală și termenul cinetic. La rezolvarea problemelor de dimensionare și verificare se iau în considerație numai pierderile de sarcină distribuită.

În categoria conductelor hidraulic lungi sunt considerate următoarele tipuri: conducte monofilare cu tronsoane legate în serie, conducte cu tronsoane legate în paralel, conducte cu debit uniform distribuit, conducte ramificate, conducte care distribuie debite constante la echidistanță etc.

Relațiile generale de calcul hidraulic se particularizează în acest caz sub următoarele forme:

- ecuația caracteristică pentru viteza medie (formula Chézy):

$$(3.53) \quad v = C \sqrt{R J},$$

unde C este coeficientul lui Chézy; $R = D/4$ – raza hidraulică pentru conducta de formă circulară; J – panta hidraulică (pierdere de sarcină liniară/distribuită unitară);

- caracteristica hidraulică de debit:

$$(3.54) \quad (a) \quad Q = A C \sqrt{R J}, \text{ sau } (b) \quad Q = K \sqrt{J};$$

- pierdere de sarcină liniară pe un tronson de calcul:

$$(3.55) \quad h_{r,i} = 0,0826 \frac{\lambda_i \ell_i}{D_i} Q^2 = M_d Q^2 = J \ell = \frac{\ell}{K^2} Q^2,$$

iar pe întreg sistemul

$$(3.56) \quad H^* = \sum_{i=1}^n h_{r,i} = M Q^2 = Q^2 \sum_{i=1}^n M_{d,i}.$$

3.3.3.2. Conducte lungi cu tronsoane montate în serie

Conform schemei de calcul pentru o conductă lungă cu "n" tronsoane montate în serie, pe lungimea cărora nu există distribuții

de debite (fig 3.24), se pot scrie următoarele relații principale de calcul:

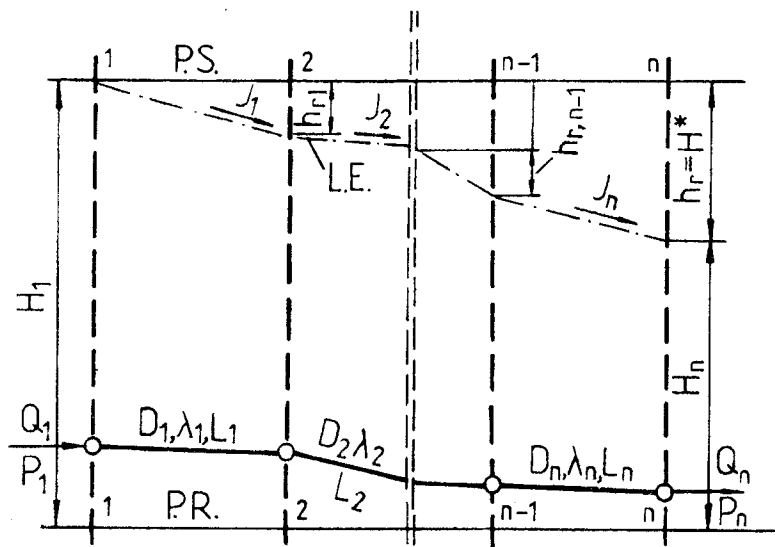


Fig. 3.24. Schema conductelor lungi cu tronsoane în serie.

- ecuația de continuitate, unde debitul este constant pe cele n tronsoane:

$$(3.57) \quad Q_1 = Q_2 = Q_3 = \dots = Q_n$$

- pierderile de sarcină se vor însuma pe cele n tronsoane, în conformitate cu relația energiei aplicată sistemului:

$$(3.58) \quad H^* = \sum_{i=1}^n h_{r,i} = h_{r,1} + h_{r,2} + h_{r,3} + \dots + h_{r,n};$$

- modulul de rezistență pentru cele n tronsoane legate în serie poate fi exprimat printr-un **modulul de rezistență echivalent** (M_e), conform relației:

$$(3.59) \quad M_e = \sum_{i=1}^n M_i.$$

Problema de dimensionare în acest caz este de tip matematic nedeterminată. În general, se introduc o serie de condiții tehnico-economice (cost total minim, viteze economice, restricții de viteză și presiuni, anumite materiale etc), care permit

aflarea diametrelor. Problemele de verificare se referă la calculul debitului tranzitat, determinarea sarcinii sistemului (H^*) și a vitezei medii pe cele n tronsoane.

Pe profilul longitudinal al conductei se reprezintă liniile caracteristice, respectiv linia piezometrică și linia energetică, care este fragmentată prin pantele diferite (J_i) rezultate pe cele n tronsoane.

3.3.3.3. Conducte lungi cu tronsoane montate în paralel

Montarea în paralel a conductelor este utilizată în scopul majorării debitului transportat între două noduri ale rețelei, când, din punct de vedere economic, dar și hidraulic, nu se poate realiza o conductă monofilară.

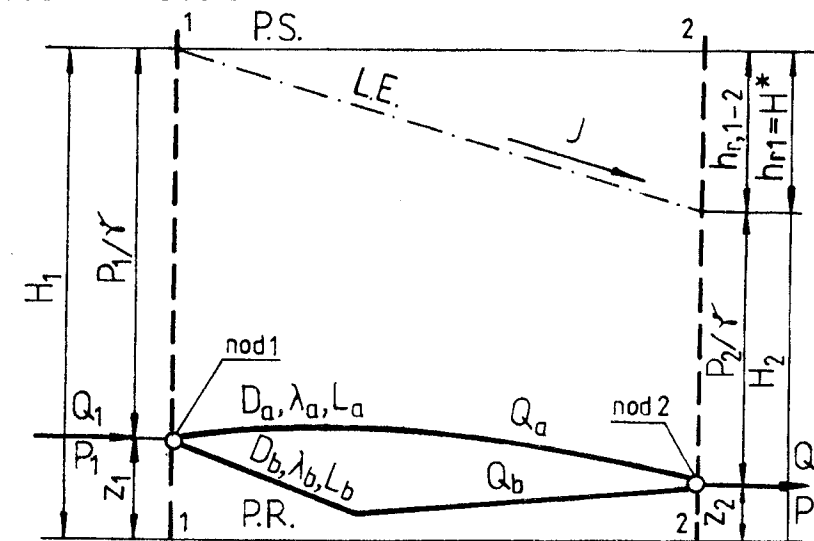


Fig. 3.25. Schema de calcul pentru conducte cu tronsoane montate în paralel.

Spre exemplu, între nodurile 1 și 2 se montează în paralel cu conducta "a - existentă" conducta simplă "b" (fig 3.25). Conductele a și b, montate în paralel, prezintă diametre, lungimi, materiale de execuție, debite, modulele de rezistență (M_a , respectiv M_b) etc diferite.

Ecuția de continuitate aplicată sistemului are forma:

$$(3.60) \quad Q = \sum_{i=1}^n Q_i ,$$

iar în nodul de intrare, precum și în cel de ieșire, trebuie respectată *condiția de nod*:

$$(3.61) \quad \sum_{i=1}^n Q_{nod} = 0 \quad \text{sau} \quad Q_{in} = Q_e$$

unde Q_{in} și Q_e sunt debitele în nodul de intrare, respectiv în nodul de ieșire. Conform relației (3.2) aplicată într - un nod se obține:

$$(3.62) \quad Q_1 = Q_a + Q_b \quad \text{sau} \quad Q_a + Q_b = Q_2$$

unde $Q_1 = Q_{in} = Q_{al}$, $Q_2 = Q_e$. Q_a și Q_b reprezintă debitele care sunt transportate pe tronsonul a , respectiv b , iar Q_{al} este debitul de alimentare al sistemului hidraulic format numai din cele două conducte.

Prin aplicarea legii energiilor între nodurile 1 și 2, pe cele două trasee de transport, rezultă că pierderile de sarcină sunt egale (liniile piezometrice și energetice au o poziție identică), respectiv:

$$(3.63) \quad h_{r,a} = h_{r,b} = h_{r,1-2} = H^* ,$$

sau

$$(3.64) \quad M_a Q_a^2 = M_b Q_b^2 = M_e Q^2 ,$$

unde M_e este modulul de rezistență echivalent al montării în paralel.

Relațiile (3.64) permit calculul debitelor transportate de fiecare conductă (în ipoteza cunoașterii debitului total, sarcinii sistemului și parametrilor geometrici):

$$(3.65) \quad Q_a = Q \sqrt{\frac{M_e}{M_a}} \quad \text{și} \quad Q_b = Q \sqrt{\frac{M_e}{M_b}} ,$$

iar în cazul a n conducte montate în paralel

$$(3.66) \quad Q_i = \frac{Q}{1 + \sum_{i=2}^n \sqrt{\frac{M_i}{M_e}}} .$$

Din ecuația de continuitate aplicată sistemului sub forma:

$$(3.67) \quad Q = Q \sqrt{\frac{M_e}{M_a}} + Q \sqrt{\frac{M_e}{M_b}}$$

se obține expresia modulului de rezistență echivalent

$$(3.68) \quad \frac{1}{\sqrt{M_e}} = \frac{1}{\sqrt{M_a}} + \frac{1}{\sqrt{M_b}} .$$

Modulul de rezistență echivalent se calculează în cazul a n conducte montate în paralel cu relația:

$$(3.69) \quad \frac{1}{\sqrt{M_e}} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{\sqrt{M_i}} .$$

Relațiile (3.60...3.69) permit rezolvarea problemelor de proiectare și verificare. Pentru determinarea debitelor Q_i de pe tronsoanele legate în paralel se folosește un calcul iterativ, în situația cunoașterii parametrilor geometrici și a sarcinii $h_{r,1+2} = H^*$. În prima iterație se aleg valorile coeficienților de rezistență λ_i corespunzătoare zonei turbulenței rugoase, rezultând prin calcul modulele de rezistență M_i și debitele Q_i pe tronsoane. În a doua iterație, cu valorile preliminare ale debitelor Q_i se determină zona de curgere specifică regimului turbulent, respectiv coeficienții λ_i și valorile corectate ale debitelor pe tronsoane și așa mai departe, pînă este îndeplinită toleranța de calcul impusă.

3.3.3.4. Conducte cu debite uniform distribuite

Conductele lungi cu funcție de distribuție exterioară a apei potabile, în cazul unor consumatori poziționați la distanțe reduse și apropiate ca valoare, cu cerințe de debit aproximativ egale, pot fi considerate ca fiind **conducte cu debite uniform distribuite**.

Conform schemei de calcul din fig.3.26, conducta cu lungimea L și diametrul $D = \text{const}$ distribuie în mod uniform pe lungimea sa un debit specific q și tot odată, tranzitează prin nodul de ieșire un debit Q_t .

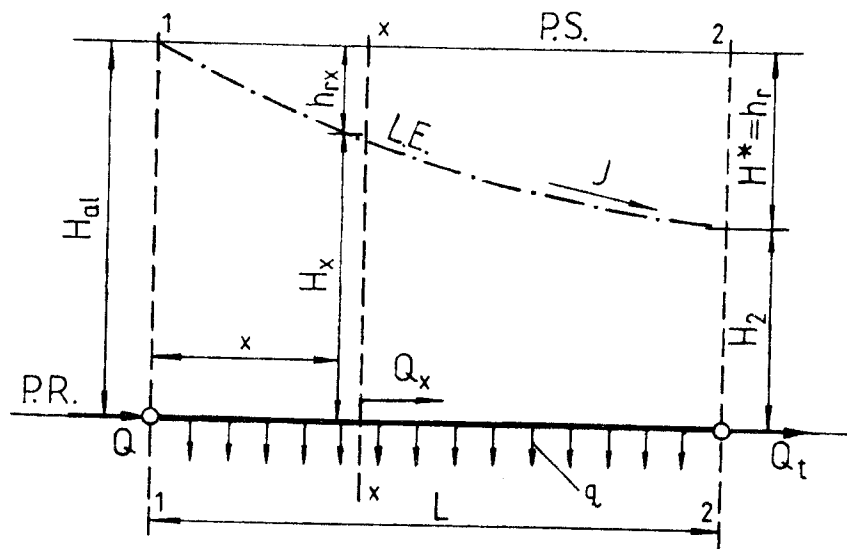


Fig.3.26. Schema de calcul la conducta cu debit uniform distribuit.

Debitul de alimentare Q rezultă din ecuația de continuitate aplicată în nodul de intrare al conductei, respectiv:

$$(3.70) \quad Q = Q_t + Q_d,$$

unde debitul uniform distribuit se determină cu relația

$$(3.71) \quad Q_d = q \cdot L.$$

Într-o secțiune de calcul amplasată la distanța x de nodul de alimentare, debitul Q_x , conform ecuației de continuitate, va fi:

$$(3.72) \quad Q_x = Q_t + Q_d - q \cdot x,$$

iar cota piezometrică H_x , prin aplicarea ecuației energiei față de un plan de referință orizontal luat prin axul conductei, rezultă sub forma:

$$(3.73) \quad H_x = H_{al} - h_{r,x} - \frac{\alpha v_x^2}{2g},$$

unde H_{al} este sarcina de alimentare. Rezultă că, debitul pe lungimea conductei este variabil, în timp ce presiunea nu variază linear ca în cazul conductelor monofilare cu debit constant. Variația presiunii este de tip parabolic.

Pierderea de sarcină pe întreaga conductă se calculează cu relația:

$$(3.74) \quad h_{r_{1-2}} = \frac{0,0826 \lambda L}{D^5} \left(Q_t^2 + Q_t Q_d + \frac{1}{3} Q_d^2 \right),$$

sau

$$(3.75) \quad h_{r_{1-2}} \cong \frac{0,0826 \lambda L}{D^5} (Q_t^2 + 0,55 Q_d^2),$$

în condiția unui număr mare de distribuții, în general, $n > 100$.

Conform relației (3.75), **debitul de calcul** - Q_c pentru determinarea pierderii de sarcină pe conductele cu debit uniform distribuit rezultă sub forma:

$$(3.76) \quad Q_c = Q_t + 0,55 Q_d \cong Q_t + 0,5 Q_d.$$

În cazul conductelor fără debit de tranzit ($Q_t = 0$, $Q_{al} = Q_d$), respectiv tot debitul de alimentare se distribuie în lungul conductei, relația (3.74) devine:

$$(3.77.a) \quad h_{r_{1-2}} = \frac{0,0826 \lambda L}{3D^5} Q_d^2,$$

sau

$$(3.77.b) \quad h_r = J_a \frac{L}{3},$$

unde J_a este panta hidraulică determinată cu debitul de alimentare. Relațiile (3.77.a și 3.77.b) sunt valabile în zona turbulenței rugoase.

Dacă numărul de distribuții este redus, relația de calcul (3.77.b) se scrie sub forma:

$$(3.78) \quad h_r = f \cdot J_a \cdot L,$$

unde f este un coeficient ce depinde de numărul "n" de distribuții. Pentru o singură distribuție, respectiv $Q = Q_t$, $Q_d = 0$, rezultă $f = 1$, respectiv o conductă simplă cu debit de tranzit; pentru n distribuții, valorile de calcul sunt prezentate în tabelul 3.11.

Tabel 3.11. Valorile coeficientului de corecție f (n).

n	1	5	10	20	30	40	50	100	>100
f	1	0,440	0,385	0,359	0,350	0,345	0,343	0,338	0,333

Linia piezometrică este un arc de parabolă de gradul doi pentru funcționarea conductei cu debit uniform distribuit în zona turbulenței rugoase (fig. 3.26). În cazul conductelor numai cu debit distribuit ($Q_t = 0$), tangenta în secțiunea finală la linia piezometrică este orizontală.

3.3.4. Caracteristica hidraulică a conductei

3.3.4.1. Caracteristica hidraulică a conductei gravitaționale

Dependența dintre sarcina H^* și debitul Q transportat de o conductă se numește **caracteristica hidraulică a conductei** și este exprimată prin relația:

$$(3.79) \quad H^* = f(Q).$$

Dacă se exprimă sarcina aval, $H_{av} = H^*$, în funcție de sarcina amonte, H_{am} , pentru un ecart de debite cărora le corespund pierderile de sarcină $h_r = M \cdot Q^2$, relația (3.79) devine:

$$(3.80) \quad H_{av} = H_{am} \pm M \cdot Q^2,$$

unde semnul este dat de modul de circulație a debitului.

În cazul conductei cu curgere gravitațională, alimentată de un rezervor situat la cota geodezică $H_g = H_{am}$ (fig.3.27), se obține:

$$(3.81) \quad H_{av} = H_g - M \cdot Q^2, \text{ sau } H = H_g - M \cdot Q^2,$$

respectiv, energia hidraulică disponibilă în secțiunea aval a conductei este energia specifică a apei din rezervor, din care se scad pierderile de sarcină formate pe lungimea activă a conductei.

Ecuția (3.81) este considerată "caracteristica hidraulică a conductei gravitaționale".

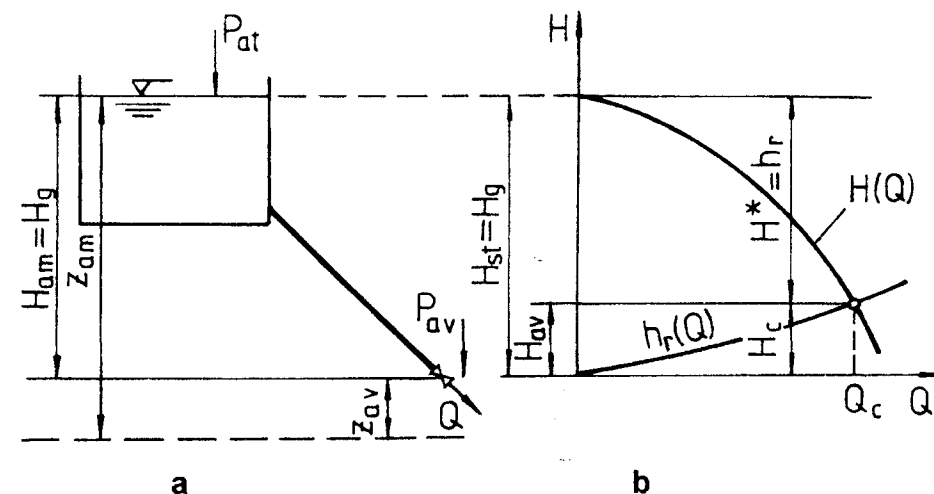


Fig.3.27. Caracteristica hidraulică a conductei gravitaționale: a – schema de calcul; b – reprezentarea grafică.

Dacă se exprimă sarcina amonte în funcție de cea aval, ecuația (3.79) prezintă forma:

$$(3.82) \quad H_{am} = H_{av} + M \cdot Q^2.$$

3.3.4.2. Caracteristica hidraulică a conductei de pompare

În cazul conductelor puse sub presiune prin intermediul unei pompe, sau de o stație de pompare (fig.3.28), ecuația (3.82) devine:

$$(3.83) \quad H_c = H_{st} + M \cdot Q^2,$$

sau

$$(3.84) \quad H_c = H_g + M \cdot Q^2.$$

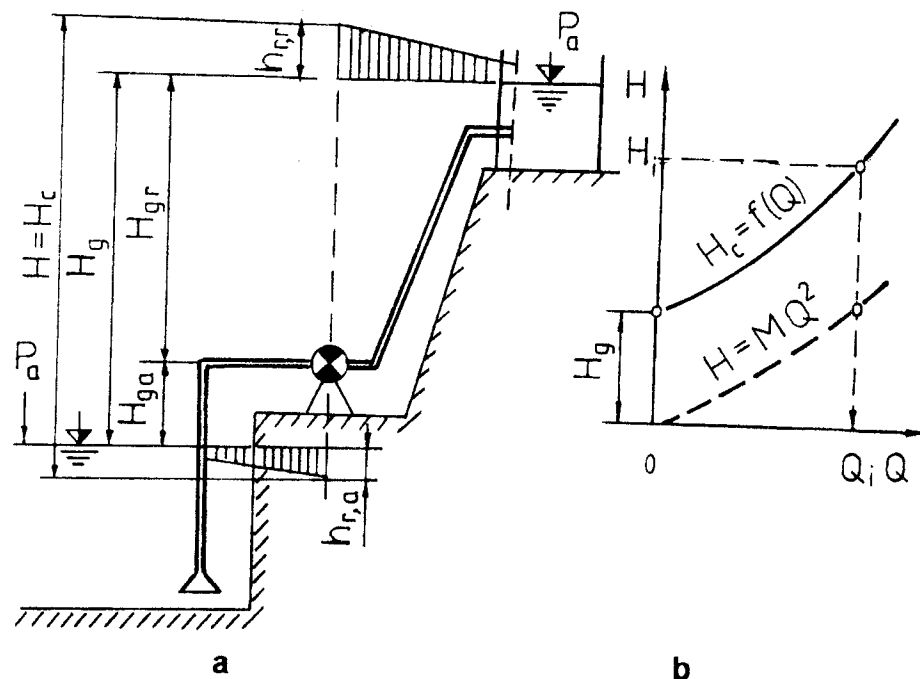


Fig. 3.28. Caracteristica hidraulică a conductei de pompare: a – schema de calcul; b – reprezentarea grafică.

În ecuația (3.83) prin H_{st} s-a notat înălțimea de ridicare statică, specifică instalațiilor de pompare alimentate din conducte sau rezervoare aflate sub presiune și care refulează în rezervoare/conducte sub presiune; în acest caz H_{st} are forma:

$$(3.85) \quad H_{st} = H_g + \frac{p_r - p_a}{\gamma},$$

unde p_r este presiunea din secțiunea de refulare; p_a – presiunea din secțiunea de aspirație. Pentru o presiune manometrică la aspirație ($p_a=0$) relația (3.85) devine:

$$(3.86) \quad H_{st} = H_g + \frac{p_r}{\gamma},$$

unde presiunea de refulare poate reprezenta presiunea de serviciu p_s , respectiv sarcina de serviciu $H_s = p_r/\gamma = p_s/\gamma$. În situația refulării

într-un bazin sau rezervor cu nivel liber ($p_r/\gamma = 0$, în planul manometric), ecuația caracteristică a instalației are forma (3.84).

În situația unei înălțimi statice, sau geodezice neglijabile în raport cu valoarea pierderilor de sarcină, rezultă $H_{st} = H_g \approx 0$ (ex. conducta de by-pass); relațiile (3.81...3.84) devin în acest caz:

$$(3.87) \quad H_c = M \cdot Q^2.$$

În relațiile (3.83 și 3.84) termenii sunt definiți sub forma:

$$(3.88) \quad H_g = H_{ga} + H_{gr}$$

$$(3.89) \quad M = M_a + M_r$$

unde H_{ga} și H_{gr} sunt înălțimea geodezică de aspirație, respectiv de refulare a pompei sau stației de pompare.

3.3.4.3. Caracteristica hidraulică a conductei cu tronsoane montate în serie

Caracteristica hidraulică a conductelor monofilare cu tronsoane montate în serie se obține din relația (3.56), prin însumarea în serie a caracteristicilor fiecărui tronson (fig. 3.29).

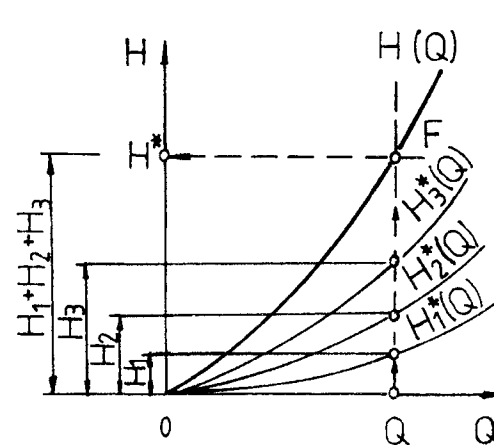


Fig. 3.29. Curba caracteristică a unei conducte monofilare cu tronsoane montate în serie.

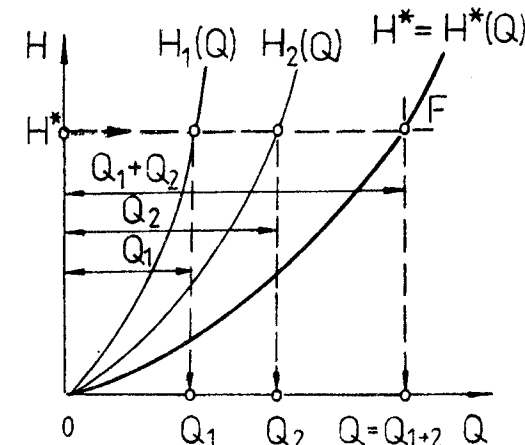


Fig. 3.30. Curba caracteristică a unui sistem de conducte cu tronsoane montate în paralel.

Ordonata unui punct curent F_i al curbei caracteristice se obține prin însumarea caracteristicilor $H_i = H_i(Q)$ pentru aceeași abscisă Q_i . Reprezentarea grafică permite determinarea directă a debitului corespunzător unei sarcini H^* date.

De asemenea, pot fi determinate pierderile de sarcină pe fiecare tronson de conductă în funcție de caracteristicile acestora și corespunzătoare debitului transportat. Tot odată, reprezentarea grafică permite și determinarea sarcinii H^* necesare transportului debitului Q_i .

3.3.4.4. Caracteristica hidraulică a conductei cu tronsoane montate în paralel

Curba caracteristică pentru un sistem de conducte legate în paralel se obține din însumarea, în paralel, a curbelor caracteristice $H_i = H_i(Q)$, date de relația (3.63). Abscisa unui punct curent F_i al curbei $H^* = H^*(Q)$ se obține prin însumarea absciselor caracteristicilor $H_i = H_i(Q)$, specifice tronsoanelor de conductă legate în paralel, conform celor rediate în figura 3.30.

Reprezentarea grafică permite determinarea debitului Q transportat de sistem, precum și repartitia debitelor Q_i pe conductele legate în paralel, în situația cunoașterii sarcinii disponibile H^* . De asemenea, dacă se cunoaște debitul Q transportat de sistemul hidraulic se poate obține sarcina H^* necesară întreținerii curgerii, precum și debitele Q_i repartizate pe conductele legate în paralel.

3.3.5. Funcționarea conductelor gravitaționale în funcție de poziția liniei piezometrice

O serie de particularități în calculul hidraulic, precum și în funcționare, le prezintă conductele a căror linie piezometrică este poziționată la o cotă inferioară axei longitudinale. În acest caz, presiunea absolută interioară este mai mică decât presiunea atmosferică, astfel că aerul dizolvat în apă începe să se degaje și se acumulează în zonele de cotă înaltă. Acumularea de gaze

determină micșorarea secțiunii de curgere și implicit a debitului, până la întreruperea totală a curgerii (dezamorsarea conductei). În situația unei presiuni vacuumetrice mai mici decât presiunea de vaporizare se inițiază și se întreține fenomenul de cavitație.

Proiectarea parametrilor hidraulici ai conductelor lungi, de tip gravitațional, trebuie să ia în considerare poziția liniei piezometrice pe tronsoanele legate în serie, pentru evidențierea tipului și valorilor presiunii în anumite secțiuni de calcul. Totodată, se obțin date privind necesitatea adoptării și proiectării dispozitivelor și instalațiilor de protecție, specifice fiecărui mod de funcționare hidraulică (suprapresiune și subpresiune).

Conducta gravitațională ce leagă două rezervoare cu nivel liber, sau alimentează un nod de distribuție, are linia piezometrică descrisă de linia N_1-N_2 (fig. 3.31), în cazul unui debit și diametru cu valori constante. Planul (linia) de sarcină totală va fi situat cu p_a/γ metri deasupra liniei $N_1 - N_2$ (p_a – presiunea atmosferică). Conducta prezintă următoarele moduri de funcționare în funcție de pozarea axului longitudinal în raport cu linia piezometrică:

A – Traseele de pozare **1**, **2** și **3** sunt situate sub linia piezometrică astfel că funcționarea conductei se realizează la o presiune mai mare decât cea atmosferică. Traseul **2** va prezenta o presiune mult mai mare, fapt care impune folosirea unei conducte cu pereți mai groși; de asemenea, în punctele situate la cote inferioare se vor depune aluviunile transportate de apă (Punctul de cotă minimă se va dota cu un robinet de golire). Conducta cu traseul **3** va prezenta o presiune interioară mai redusă, fapt ce determină micșorarea grosimii pereților.

B – Conducta pozată pe traseul **4** se situează cu tronsonul **A - B** deasupra liniei piezometrice, dar sub planul apei (planul de sarcină manometric), determinat de cota apei din rezervorul de alimentare. Conductele de acest tip se numesc **conducte în sifon urcător**.

Deoarece punctul cu cota cea mai înaltă, V , se află situat sub nivelul apei din rezervor, conducta poate funcționa în două situații diferite. Acestea sunt determinate de raportul dintre înălțimea geodezică disponibilă $z = z_V - z_{V1}$ și cota de presiune

vacumetrică la limită $(p_a - p_v)/\gamma$. Presiunea de vaporizare, p_v , va corespunde temperaturii apei din conductă.

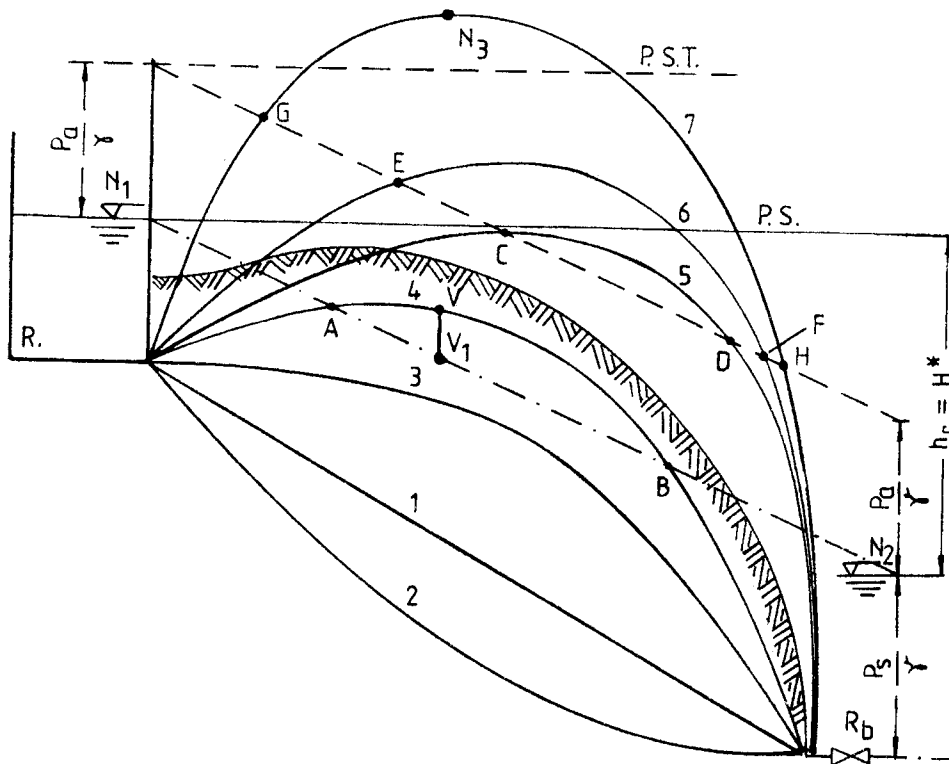


Fig.3.31. Cazuri de funcționare a conductei gravitaționale.

În prima fază, conducta se umple pînă în punctul V, după care apa curge gravitațional către secțiunea robinetului de ieșire. Dacă $z < (p_a - p_v)/\gamma$, curentul de apă cu viteză ridicată va antrena aerul din zona înaltă a conductei, pînă la eliminarea totală a acestuia (fenomenul de amorsare a curgerii); funcționarea are loc ca și cînd conducta ar fi amplasată sub linia piezometrică, dar pe tronsonul A - B presiunile sunt vacumetrice.

Evacuarea aerului din zona înaltă a conductei se poate realiza și prin folosirea unor procedee și instalații diverse. Se poate utiliza un ventil de desaerisire montat în punctul de cotă

cea mai înaltă a conductei, sau o instalație cu o pompă de vacuum.

Dacă $z > (p_a - p_v)/\gamma$, rezultă că în punctul V de cotă maximă presiunea absolută este presiunea de vaporizare, a cărei valoare se menține constantă pînă în punctul B.

Pe tronsonul V - B, curgerea are loc cu conducta parțial plină, iar linia piezometrică va fi paralelă cu axul conductei și situată sub acesta la distanța $h = (p_a - p_v)/\gamma$; pe tronson se produce degajarea aerului dizolvat în apă și se manifestă acțiunile specifice fenomenului de cavitație.

Punctul V trebuie dotat în mod obligatoriu cu o instalație pentru evacuarea aerului, care include o pompă de vacuum.

Pe tronsoanele N₁ - V și B - Rb, unde curgerea este la secțiunea plină a conductei, linia piezometrică are aceeași poziție și se realizează aceeași pantă hidraulică.

C – Conducta pozată pe traseul 5 intersectează prin intermediul tronsonului C - D planul de sarcină totală. Deoarece punctul cel mai înalt se află sub cota apei la plecarea din rezervor, curgerea în conductă are loc cu nivel liber, asemenea mișcării apei într-un canal.

D – Conducta pozată pe traseul 6 nu poate funcționa datorită presiunilor absolute negative ce apar pe tronsonul E - F. O soluție ar fi prin ridicarea apei pînă în punctul de cotă maximă (absorbție sau pompare), după care, pe tronsonul coborător se realizează o curgere cu nivel liber ca într-un canal.

E – Conducta amplasată pe traseul 7 nu poate funcționa, deoarece pe tronsonul G - H se formează presiuni absolute negative, care dezamorsează fenomenul de curgere. Singura variantă posibilă de funcționare ar fi transformarea conductei gravitaționale într-o conductă de pompare cu înălțimea geodezică de refulare $H_{gr} = Z_{N,1} - Z_{N,3}$.

Problemele de acest tip se pun și în cazul conductelor hidraulic scurte cu curgere gravitațională.

3.3.6. Parametrii de funcționare ai sistemului hidraulic

3.3.6.1. Parametrii de funcționare la conductele gravitaționale. Punct de funcționare

Parametrii de funcționare la un moment dat ai sistemului hidraulic se obțin din rezolvarea sistemului de ecuații ce caracterizează starea fiecărui element component. Sistemul este format din următoarele componente: ecuația de continuitate, ecuația energiei (aplicată în diverse secțiuni ale instalației), ecuațiile de stare fizică a parametrilor funcționali, ecuații caracteristice armăturilor de reglare sau a pompelor etc.

Soluția sistemului este reprezentată de valorile momentane ale debitelor, sarcinii disponibile, vitezelor, pierderilor de sarcină, pantei hidraulice etc, care caracterizează la momentul respectiv starea funcțională a sistemului. Rezolvarea sistemului de ecuații poate fi de tip analitic sau grafo – analitic, în funcție de gradul de precizie dorit (fig. 3.32).

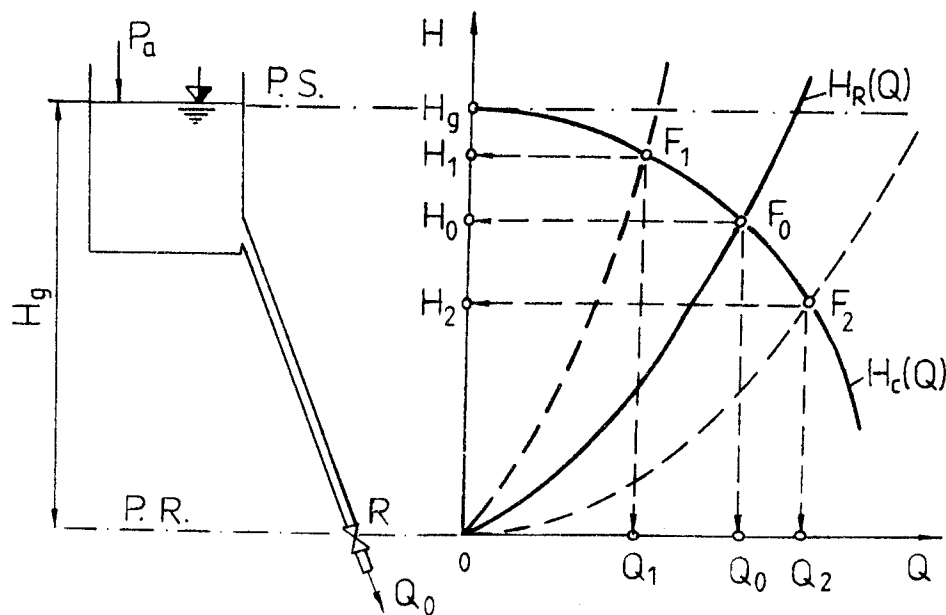


Fig.3.32. Punctul de funcționare la conducta gravitațională

Rezolvarea grafică permite evidențierea și interpretarea unor situații funcționale, care pot fi intuite și apreciate mult mai ușor. Se admite că soluția sistemului aparține unui punct de funcționare caracteristic la un moment dat instalației hidraulice. Schimbarea condițiilor de exploatare ale sistemului hidraulic determină și modificarea valorilor parametrilor conținuți de punctul de funcționare, fapt care impune o nouă rezolvare a sistemului de ecuații.

Sistemul de ecuații care descrie funcționarea în mișcare permanentă a instalației hidraulice constituită din *rezervor + conductă de transport + armătură (robinet) de reglare*, este format, în principal, din două ecuații:

- *caracteristica hidraulică a conductei gravitaționale,*
- *caracteristica hidraulică a armăturii de reglare.*

La acestea se pot adăuga ecuațiile caracteristice ale armăturilor și dispozitivelor de protecție la suprapresiuni și subpresiuni.

Sistemul format din cele două ecuații are forma:

$$(3.90) \quad \begin{cases} H_c = H_g - M_c \cdot Q^2 \\ H_R = f(Q) \end{cases}$$

cu observația că modulul de rezistență al conductei gravitaționale (M_c , ecuația 3.81) se calculează fără includerea modulului de rezistență al armăturii de reglare (robinetul - M_R), adică

$$(3.91) \quad M_c = M - M_R,$$

unde M este modulul total de rezistență.

Caracteristica hidraulică a robinetului, $H_r = f(Q)$, depinde de tipul constructiv al acestuia și de caracteristicile deschiderii (gradul său de deschidere la robinetele sertar, unghiul θ la robinetele fluture etc).

Rezolvarea analitică sau grafo - analitică a sistemului de ecuații (3.90) permite obținerea punctului de funcționare F_0 , de coordonate Q_0 și H_0 , pentru o mișcare permanentă în conductă (fig.3.32).

Reprezentarea grafică evidențiază obținerea de noi puncte de funcționare, conform solicitărilor consumatorilor. Acestea se obțin prin manevra robinetului de reglare a debitului montat în secțiunea aval a conductei (fig.3.32), sau prin alte procedee de reglaj. Punctele noi de funcționare obținute prin manevra robinetului pot avea următorii parametrii

- $F_1(Q_1, H_1)$ cu $Q_1 < Q_0$ și $H_1 > H_0$ la închiderea parțială a robinetului față de poziția inițială;
- $F_2(Q_2, H_2)$ cu $Q_2 > Q_0$ și $H_2 < H_0$ la deschiderea parțială a robinetului față de poziția inițială etc.

3.3.6.2. Parametrii de funcționare la conductele instalațiilor de pompare. Punct de funcționare

Sistemul de ecuații, care descrie funcționarea în mișcare permanentă a instalației de pompare formată din *rețeaua interioară + pompe + rețea exterioară (conductă de refulare)* este constituit, în principal, din două ecuații:

1 - *caracteristica hidraulică a rețelei exterioare* (conducta de refulare);

2 - *caracteristica energetică a pompei* (sau pompelor cuplate în serie sau paralel).

Pentru definirea în totalitate a parametrilor specifici instalațiilor de pompare, sistemul de ecuații se mai completează cu ecuațiile caracteristice de randament, putere și NPSH ale pompelor. Rezultă un sistem de ecuații cu următoarea formă generală:

$$(3.92) \quad \begin{cases} H_c = H_g + M_c \cdot Q^2 \\ H_p = f_1(Q) \\ \eta = f_2(Q) \\ P = f_3(Q) \\ NPSH = f_4(Q) \end{cases}$$

Prin rezolvarea analitică sau grafo - analitică a primelor două ecuații rezultă parametrii punctului de funcționare $F_0(Q_0, H_0)$ caracteristici instalației de pompare pentru o turație constantă n_0 a pompei.

Rezolvarea integrală a sistemului de ecuații (3.92) conduce la un punct de funcționare de forma $F_0(Q_0, H_0, \eta_0, P_0, NPSH_0, n_0 = \text{const.})$.

Rezolvarea grafo - analitică a sistemului de ecuații pune în evidență diverse situații funcționale în funcție de procedeul de reglaj utilizat (fig. 3.33). Dar, pentru o exploatare optimă din punct de vedere energetic, punctul de funcționare F_0 obținut trebuie să se situeze în zona randamentelor maxime ale pompei.

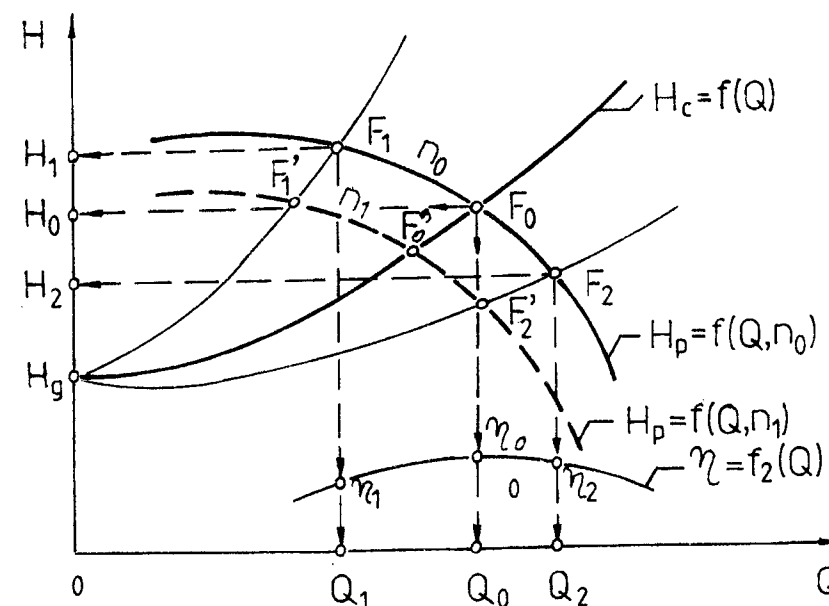


Fig. 3.33. Punctul de funcționare la conducta de pompare

Prin modificarea modului de rezistență al rețelei exterioare ($H_c = f(Q)$), obținut, de exemplu, prin reglarea gradului de deschidere al robinetului, rezultă punctele de funcționare $F_1(Q_1, H_1)$ cu $Q_1 < Q_0$ și $H_1 > H_0$ la închiderea robinetului, sau $F_2(Q_2, H_2)$ cu $Q_2 > Q_0$ și $H_2 < H_0$ la deschiderea robinetului, pentru o turație

nominală și constantă n_0 a pompei etc. În cazul modificării turăției pompei de la n_0 la n_1 , rezultă puncte noi de funcționare a instalației hidraulice (F'_0, F'_1, F'_2 etc), cu parametrii caracteristici respectivi.

Înălțimea geodezică H_g se calculează cu relația (3.85 sau 3.88), iar modulul de rezistență M_c cu relația (3.89). În cazul unei stații de pompare echipată cu mai multe pompe, pierderea de sarcină h_{ra} pe aspirație va corecta caracteristica energetică a pompei, iar în ecuațiile (3.83 și 3.84) se va folosi $M = M_r = M_c$.

Înălțimea geodezică de aspirație, H_{ga} , depinde de modul de amplasare al agregatului de pompare în raport cu nivelul apei din bazinul de aspirație, altitudinea și parametrii de stare fizică a apei. Pompa funcționează fără cavitație, dacă este îndeplinită condiția

$$H_{ga} < H_{ga,max},$$

unde $H_{ga,max}$ este înălțimea geodezică de aspirație corespunzătoare inițierii fenomenului de cavitație. Valoarea $H_{ga,max}$ rezultă din relația:

$$(3.93) \quad H_{ga,max} = \frac{p_{at} - p_{cr}}{\rho g} - \frac{A(m)}{900} - h_{r,a} - NPSH_p,$$

sau prin înlocuirile $p_{cr} = p_v$,

$$(3.94) \quad H_{ga,max} = \frac{p_{at}}{\gamma} - \frac{A(m)}{900} - \frac{p_v}{\gamma} - h_{r,a} - NPSH_p.$$

Mărimea $NPSH_p$ (net positive suction head = înălțimea energetică netă absolută cerută de aspirație) rezultă din datele furnizate de firma producătoare a pompei. Parametrul A reprezintă altitudinea la care se amplasează pompa.

Valoarea presiunii atmosferice se va lua în funcție de altitudinea la care este amplasată pompa sau stația de pompare. În relația (3.94) se admite $p_{at}/\gamma = 10,33$ mca, valoare corespunzătoare la nivelul Mării Negre, dacă se introduce parametrul A .

O influență deosebită o prezintă valoarea pierderilor de sarcină pe aspirație ($h_{r,a}$), motiv pentru care în proiectare viteza pe această conductă este limitată ($v_a = 0,8 - 1,2$ m/s).

3.3.6.3. Variația presiunii apei în conducte

Presiunea apei într-o conductă se manifestă prin două forme principale: presiune statică și presiune dinamică. Presiunea hidrostatică maximă la o conductă gravitațională se înregistrează în situația închiderii robinetului din secțiunea de refulare (fig. 3.34). Valoarea acesteia se determină cu relația:

$$(3.95) \quad p_s = \rho g H_s$$

unde $H_s = H_g$, dacă presiunea la suprafața apei din rezervorul de aspirație, respectiv de refulare este egală cu presiunea atmosferică. Presiunea statică este variabilă în lungul conductei, în funcție de dispoziția secțiunii de calcul în profilul longitudinal (fig. 3.34). Presiunea dinamică este dată de parametrii punctului de funcționare.

Mișcarea apei în instalațiile hidraulice specifice sistemului de alimentare cu apă este de tip tranzitoriu, datorită variației în timp a condițiilor la limită. Regimul tranzitoriu este determinat de schimbarea parametrilor regimului de funcționare, de pornirea și oprirea pompelor, de închiderea și deschiderea robinetelor, de producerea unei avarii etc.

Dimensionarea instalației hidraulice impune de cele mai multe ori efectuarea calculelor pentru obținerea parametrilor mișcării tranzitorii, în special pentru anumite cazuri de funcționare. Mișcările tranzitorii în sistemele hidraulice sub presiune se clasifică în două grupe:

- *mișcări tranzitorii lent variabile*, caracterizate printr-o variație mică în timp a mărimilor caracteristice (presiuni, debite, viteze), astfel încât lichidul poate fi considerat incompresibil;
- *mișcări tranzitorii rapid variabile*, caracterizate printr-o variație bruscă, sau rapidă în timp a mărimilor caracteristice, iar în calcul trebuie luate în considerare *compresibilitatea lichidului* și *elasticitatea materialului* de execuție a conductei.

Mișcările tranzitorii rapid variabile, denumite **șoc hidraulic**, sau **lovitură de berbec**, sunt determinate de variația bruscă a condițiilor la limită [21]. Șocul hidraulic produce modificări importante ale presiunilor, care se propagă sub forma unor unde

în lungul conductei și în ansamblul sistemului hidraulic. În cazul închiderii rapide a robinetului din secțiunea de emisie a conductei gravitaționale, modificarea de presiune începe imediat lângă robinet, după care unda de presiune se propagă în lungul conductei, de la secțiunea de formare până la rezervor, determinând linia piezometrică (1) în fig.3.34. La rezervor, datorită inerției mari a volumului de apă acumulat, unda se reflectă spre secțiunea inițială de formare și parcurge conducta în sens invers.

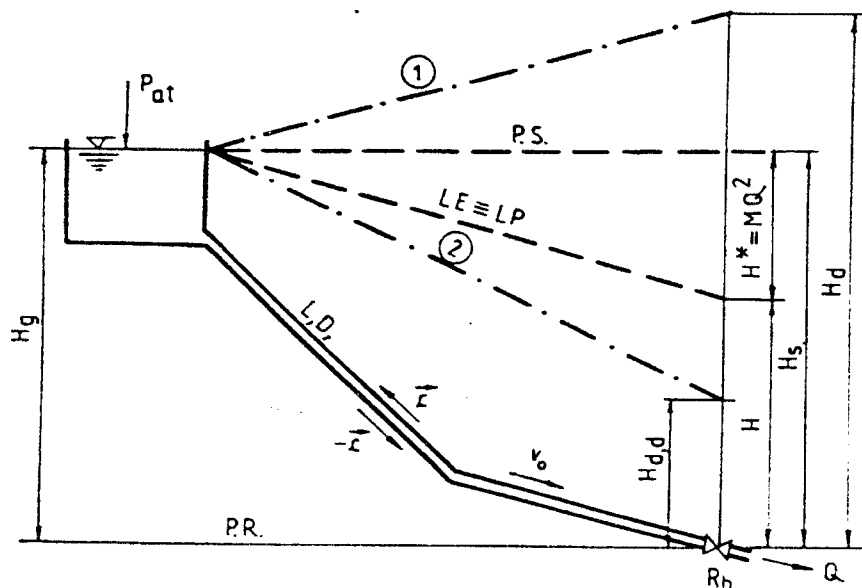


Fig. 3.34. Presiuni caracteristice în conducta gravitațională.

Viteza de propagare a undelor față de lichid se numește **celeritate** și este notată cu $\bar{c}$, iar viteza în raport cu pereții conductei se notează cu $\bar{a}$. Relația de recurență este:

$$\begin{aligned} \bar{a} &= \bar{c} \pm \bar{v}_0 \\ \bar{a} &= \bar{c} + \bar{v}_0 \quad \text{la unda directă} \\ \bar{a} &= \bar{c} - \bar{v}_0 \quad \text{la unda indirectă} \end{aligned} \quad (3.96)$$

unde v_0 este viteza medie a apei în conductă pentru mișcarea permanentă.

Timul t_p , în care unda parcurge lungimea L a conductei limitată de secțiunile de calcul, se numește *tim de parcurgere*. Valorile calculate pot fi diferite după sensul de parcurs: t_{pd} – la dus, respectiv t_{pi} – la întors. Relația de calcul are forma:

$$(3.97) \quad t_p = \frac{L}{a} \quad (a), \text{ sau } t_p = \frac{L}{c} \quad (b),$$

unde forma (3.97.b) se folosește în cazul $c \gg v$, când $a \approx c$.

În cazul unei conducte executate cu tronsoane în serie de lungimi L_i și cu caracteristici geometrice, mecanice și hidraulice diferite, timpul de parcurgere se determină cu o relație de mediere:

$$(3.98) \quad t_p = \sum_{i=1}^n \frac{L_i}{c_i}.$$

Timul t_r , în care unda parcurge lungimea L a conductei în ambele sensuri (dus-întors), se numește *tim de reflexie*. Relația de calcul, în funcție de condițiile problemei are forma:

$$(3.99) \quad t_r = 2 \cdot t_p = t_{pd} + t_{pi} \quad (a), \text{ sau } t_r = \frac{2L}{c} \quad (b).$$

În lungul conductei are loc o transformare, totală sau parțială, a energiei cinetice în lucru mecanic al forțelor de presiune, de greutate și de deformare. În conductă se dezvoltă presiuni maxime și minime, iar modul de evoluție și valoarea acestora sunt influențate de timpul de închidere a robinetului, comparativ cu timpul de propagare a undei de presiune.

În cazul închiderii parțiale sau totale a armăturii de reglare a debitului, în conductă se produce mai întâi o suprapresiune, urmată apoi de o depresiune. La deschiderea robinetului, fenomenul hidraulic se produce în mod invers, iar linia piezometrică are poziția (2) din figura 3.34.

Valoarea celerității se determină cu relația generală:

$$(3.100) \quad c = \frac{\sqrt{\frac{E_a}{\rho}}}{\sqrt{1 + \frac{D}{s_e} \cdot \frac{E_a}{E_c}}},$$

unde s_e este grosimea echivalentă a peretelui conductei. În funcție de caracteristicile mecanice și de montaj ale conductei, grosimea echivalentă a peretelui se determină cu relația generală [3]:

$$(3.101) \quad s_e = s \frac{a_2}{a_0 a_1},$$

în care s este grosimea peretelui calculată la valoarea presiunii interioare. Coeficientul a_0 ia în considerare modul de rezemare al conductei, iar valorile se calculează cu următoarele relații:

- conductă simplu rezemată

$$(3.102.a) \quad a_0 = 1;$$

- conductă încastrată la un capăt

$$(3.102.b) \quad a_0 = 1 - \mu;$$

- conductă încastrată la ambele capete

$$(3.102.c) \quad a_0 = 1 - \mu^2,$$

unde μ este coeficientul lui Poisson (tabel 3.12).

Tabel 3.12. Parametrii mecanici la țevile pentru instalații

Material	Oțel	Fontă Bronz	Beton Plumb	Mase plastice	Azbo- ciment	Dur- Aluminiu
$E_c,$ 10^{10} N/m^2	18,6 - 21,6	7,80 - 11,8	1,50 - 3,90	0,30	2,00	6,4 - 7,4
k	0,50	1,00	5	16...20	4,40	1,30
μ	0,30	0,30	0,15	0,45-0,5	0,30	0,30

Coeficientul a_1 ține cont de grosimea relativă a peretelui. Se admit următoarele tipuri de conductă, în funcție de raportul dintre diametru și grosimea peretelui:

a - conductă cu perete subțire

$$(3.103.a) \quad \frac{D}{s} \geq 25 \Rightarrow a_1 = 1,$$

b - conductă cu perete gros

$$(3.103.b) \quad \frac{D}{s} \leq 25 \Rightarrow a_1 = \frac{2s}{D} (1 + \mu) + \frac{D}{D + s}.$$

Prin coeficientul a_2 se ia în considerare neomogenitatea materialului din care este realizată conducta. Pentru conductele executate din beton armat se utilizează relația:

$$(3.104) \quad a_2 = 1 + k_m \mu_f,$$

unde coeficientul k_m depinde de marca betonului și calitatea oțelului – beton folosit la armare ($k_m = 8 \dots 15$); μ_f – coeficient de armare tip fretă, cu valori uzuale de 0,015...0,05.

În cazul sistemelor hidraulice pentru transportul și distribuția apei și pentru domeniul uzual de temperaturi ($t = 5 - 30^\circ\text{C}$), respectiv presiuni ($p = 5 - 20$ bari), unde $E_a \approx 2,03 \cdot 10^9 \text{ N/m}^2$ și $\rho = 1000 \text{ Kg/m}^3$, relația (3.100) devine:

$$(3.105) \quad c = \frac{1425}{\sqrt{1 + \frac{D}{s_e} \cdot \frac{E_a}{E_c}}},$$

denumită relația lui Jukovski, sau

$$(3.106) \quad (a) \quad c = \frac{9900}{\sqrt{48,3 + k \frac{D}{s_e}}}, \quad (b) \quad k = \frac{9,2 \cdot 10^{10}}{E_c},$$

respectiv relația lui Allievi.

Constanta k din relația (3.106.b) depinde atât de natura materialului din care este executată conducta, cât și de caracteristicile lichidului. În cazul conductelor metalice se admite valoarea $k \approx 0,5$.

Suprapresiunea, respectiv subpresiunea maximă, în cazul închiderii bruște a robinetului se obține cu relația lui Jukovski:

$$(3.107) \quad \Delta p = \pm \rho c v_0,$$

sau suprasarcina cu relația

$$(3.108) \quad \Delta H = \pm \frac{c}{g} v_0,$$

cu mențiunea că la utilizarea relațiilor se neglijează pierderile de sarcină pe conducta considerată.

Dacă închiderea robinetului se realizează într-un timp T_m (timp de manevră) mai mare decât de timpul de reflexie ($T_m > t_r$), presiunea, respectiv sarcina hidrodinamică nu mai atinge valoarea maximă, datorită amortizării undei reflectate. În acest caz, calculul suprasarcinii ΔH se efectuează cu relația lui Michaud [3]:

$$(3.109) \quad \Delta H = \pm \frac{2L v_0}{g T_m},$$

sau cu relația lui Johnson:

$$(3.110) \quad \Delta H = \frac{L v_0}{2g^2 H_s T_m^2} \left(L v_0 + \sqrt{4g^2 H_s T_m^2 + L^2 v_0^2} \right),$$

unde H_s este înălțimea statică de pompare.

În cazul instalațiilor de pompare, la oprirea accidentală a pompelor (cădere de tensiune, avarii etc), sau la închiderea bruscă a robinetului de pe refulare, în secțiunea robinetului se produce mai întâi o depresiune, urmată apoi de o suprapresiune (fig. 3.35).

La stațiile de pompare cu debite mici și mijlocii, cu conducte de refulare lungi, în situația opririi bruște a pompelor se poate folosi pentru calculul suprasarcinii ΔH relația Stoianovici [3],

$$(3.111) \quad \Delta H = \Delta H_j \left[\frac{\sqrt{1 + 4\varphi(\alpha + \psi)} - 1}{\varphi} - (\alpha + \varphi) \right],$$

unde ΔH_j reprezintă suprasarcina calculată cu relația Jukovski, (ec.3.108); coeficienții sunt definiți prin expresiile:

$$(3.112) \quad \varphi = \frac{h_r}{\Delta H_j}, \quad \psi = \frac{H_{st} + H_{vac}}{\Delta H_j}, \quad \alpha = \frac{\sqrt{1 + 4\varphi(\alpha + \psi)} - 1}{2\varphi},$$

iar în situația existenței mijloacelor de protecție la suprapresiune se admite $\alpha = 0$.

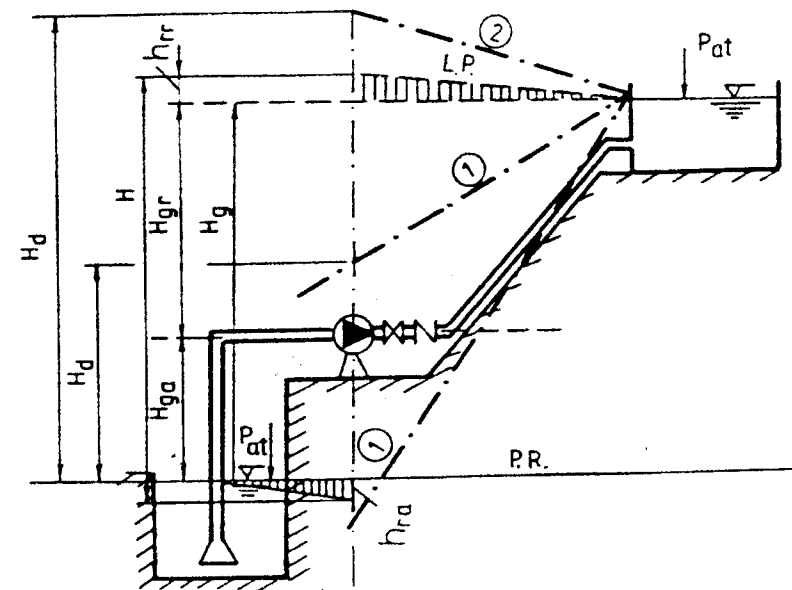


Fig. 3.35. Presiuni caracteristice la instalația de pompare (secțiunea de calcul - pompă): 1 – linia piezometrică la oprirea pompei; 2 - linia piezometrică la pornirea pompei.

În cazul cunoașterii timpului de manevră sau închidere T_m , pentru robinetul de reglare a debitului pe conducta gravitațională, pentru calcule și estimări preliminare, sau de predimensionare, se pot folosi următoarele relații de calcul [14]:

a - dacă $c \cdot v_0 < 2g \cdot H_s$, sarcina hidrodinamică maximă, H_d , este dată de soluția pozitivă obținută prin rezolvarea ecuației:

$$(3.113) \quad H_d^2 - 2H_d \left\{ H_j + \frac{c^2}{g} \left[\left(1 - \frac{t_r}{T_m} \right) \frac{v_0}{\sqrt{2gH_s}} \right]^2 \right\} + H_j^2 = 0,$$

iar soluția cu minus reprezintă subpresiunea rezultată în situația deschiderii robinetului. Parametrul t_r este timpul de reflexie al undei, iar H_j reprezintă valoarea suprapresiunii determinată cu relația Jukovski în cazul închiderii bruște a robinetului, respectiv

$$(3.114) \quad H_j = H_s + \frac{c v_0}{g};$$

b - dacă $c \cdot v_0 > 3g \cdot H_s$, sarcina hidrodinamică maximă, H_d , respectiv minimă, rezultă din rezolvarea ecuației:

$$(3.115) \quad H_d^2 - H_d H_s \left[2 + \left(\frac{L v_0}{g T_m H_s} \right)^2 \right] + H_s^2 = 0,$$

cu exemplificarea grafică în figura 3.34.

c - dacă $2g \cdot H_s < c \cdot v_0 < 3g \cdot H_s$, calculul se efectuează astfel:

- pentru un timp de închidere

$$(3.116.a) \quad T_m \leq \frac{(c v_0 - g H_s) L}{(c v_0 - 2g H_s) c}$$

valorile sarcinii hidrodinamice H_d , se determină cu relația (3.113);

- pentru un timp de închidere

$$(3.116.b) \quad T_m > \frac{(c v_0 - g H_s) L}{(c v_0 - 2g H_s) c}$$

valorile H_d , se determină cu relația (3.115).

Presiunea hidrodinamică maximă, rezultată din calculul de predimensionare, se compară cu valoarea presiunii maxime admisibile a materialului din care sunt realizate elementele componente ale conductei. În situația depășirii valorilor admise și

pentru obținerea unor valori de calcul cu un grad ridicat de încredere, se va apela la o metodă de rezolvare analitică sau grafo-analitică a șocului hidraulic, adecvată situației de calcul.

În cazul punerii în funcțiune a conductei gravitaționale aflată inițial în stare statică ($Q = 0$, $H = H_s$), prin deschiderea robinetului din capătul aval, presiunea în fața robinetului va scădea sub valoarea presiunii statice, în funcție de raportul dintre timpul de manevră și timpul de reflexie. Valorile presiunii, sau sarcinii maxime la deschidere, $H_{d,d}$, se calculează astfel:

a - dacă $T_m < t_r$, valoarea presiunii $H_{d,d}$ în secțiunea de calcul rezultă din ecuația [12]:

$$(3.117.a) \quad H_{d,d}^2 - 2H_{d,d} \left\{ H_s + \frac{c^2}{g} \left[\frac{v_m}{\sqrt{2gH_s}} \cdot \frac{t_r}{T_m} \right]^2 \right\} + H_s^2 = 0;$$

b - dacă $T_m \geq t_r$, valoarea presiunii $H_{d,d}$ rezultă din ecuația:

$$(3.117.b) \quad H_{d,d}^2 - H_{d,d} H_s \left[2 - \left(\frac{L v_m}{g T_m H_s} \right)^2 \right] + H_s^2 = 0,$$

unde v_m este viteza medie ce urmează a fi realizată în conductă.

O presiune suplimentară în modul de funcționare a conductei poate fi introdusă de acțiunea seismică. Aceasta se suprapune peste presiunea hidrodinamică existentă în conductă, fapt care determină valori ce pot depăși presiunile maxim admise. Valoarea sarcinii H_{as} , sau a presiunii, datorată acțiunii seismice, poate fi evaluată cu o relație de tipul [14]:

$$(3.118) \quad H_{as} = \frac{\rho g c_s}{2\pi} v_s T_0,$$

în care c_s este coeficientul seismic; T_0 - perioada de oscilație, care pentru cazul general de calcul se poate admite 0,5 s; v_s - viteza de propagare a undelor seismice longitudinale în sol și în apă

(Tabel 3.12). În calcul se va adopta valoarea cea mai mare obținută din analiza rezultatelor.

Coeficientul seismic poate fi apreciat, prin asimilare, cu valorile date în normativul P.100 – 78, conform relației:

$$(3.119) \quad c_s = 0,4 k_s$$

în care k_s reprezintă coeficientul de intensitate seismică, cu valori diferențiate în funcție de gradul de protecție antiseismică a construcției hidroedilitare (tabel 3.14).

Tabel 3.11. Viteze de propagare a undelor longitudinale

Nr	Natura materialul	v (m/s)
1	Apă	1500
2	Pământ cu rezistențe scăzute (nisipuri, argile, nisipuri argiloase etc)	200–500
3	Pământ cu rezistențe medii (nisipuri compacte, argile plastice, argile nisipoase etc)	500–1000
4	Pământ cu rezistențe ridicate (nisipuri foarte compacte, argile dure, marne etc)	1000–3500
5	Roci dure	3500–5000

Tabel 3.14. Valorile coeficientului de intensitate seismică k_s

Grad de protecție	6	6 1/2	7	7 1/2	8	8 1/2	9
K_s	0,007	0,09	0,12	0,16	0,20	0,26	0,32

Pentru conductele sub presiune se recomandă sporirea gradului de protecție cu o unitate față de cel corespunzător zonei de amplasare a lucrărilor hidroedilitare. De asemenea, nivelul de importanță al lucrării impune gradul de protecție antiseismică, respectiv valoarea de calcul a coeficientului.

3.4. GOLIREA REZERVOARELOR

Golirea rezervoarelor se realizează prin orificii, ajutaje și conducte scurte. Mișcarea apei, în acest caz, nu mai este de tip permanent. Natura mișcării este determinată de variația nivelului apei în rezervor, care coboară, astfel că sarcina de curgere H se modifică în timp. Debitul evacuat scade în timp până la anulare.

Rezervorul poate funcționa în următoarele situații:

a – rezervor cu nivel liber, dacă la suprafața apei presiunea $p = p_{at}$ (fig.3.36.a);

b – rezervor închis cu presiune la interior p_0 constantă și în condiția $p_0 > p_{at}$ (fig.3.36.b);

c – rezervor închis cu presiune variabilă la interior și cu respectarea condițiilor $p_0 > p_{at}$ și $p_0 \neq \text{const}$.

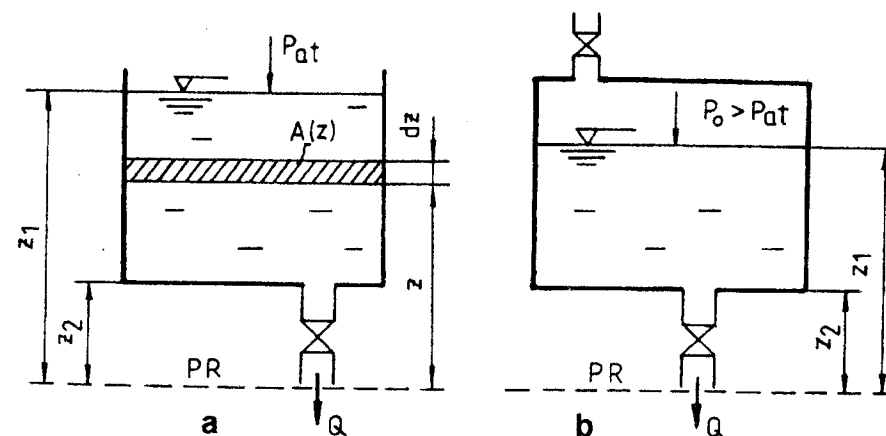


Fig.3.36. Schema de calcul pentru golirea rezervoarelor:

a – rezervor cu nivel liber; b – rezervor sub presiune constantă

Mișcarea variabilă în timp se consideră rezultatul succesiunii unor mișcări permanente desfășurate în intervale de timp foarte mici. Ecuația de continuitate se scrie sub forma:

$$(3.120) \quad Q dt = - S dz$$

unde debitul Q se consideră constant pe intervalul de timp dt . Aria secțiunii orizontale a rezervorului, $S=S(z)$, este o funcție de cota z . Semnul minus este dat de cota z , care scade în timpul golirii.

Exprimând timpul din ecuația (3.120):

$$(3.121) \quad dt = -\frac{S}{Q} dz$$

și integrând între limitele z_1 și z_2 , rezultă timpul de golire T_g :

$$(3.122) \quad T_g = \int_{z_1}^{z_2} \left(-\frac{S}{Q} \right) dz = S \int_{z_2}^{z_1} \frac{dz}{Q} \quad \text{sau} \quad T_g = \int_{z_2}^{z_1} \frac{S(z)}{Q} dz$$

Curgerea poate fi printr-un ajutoraj, sau o conductă hidraulic scurtă, situație în care debitul se exprimă sub forma:

- pentru un ajutoraj

$$(3.123) \quad \begin{aligned} Q &= \mu A \sqrt{2gH}, \quad \text{sau} \\ Q &= \mu A \sqrt{2g} \sqrt{z} \end{aligned}$$

- pentru o conductă hidraulic scurtă

$$(3.124) \quad Q = \varphi A \sqrt{2g} \sqrt{z},$$

unde μ este coeficientul de debit al ajutorajului, iar φ coeficientul de viteză al conductei scurte.

Prin înlocuirea expresiilor debitului în relația (3.122) a se obține relația generală:

$$(3.125) \quad T_g = \frac{S(z)}{\mu A \sqrt{2g}} \int_{z_2}^{z_1} \frac{dz}{\sqrt{z}}$$

Integrarea ecuației (3.125) în cazul rezervorului cu nivel liber, în condițiile $z = H$, scară manometrică ($p_{\text{man}} = 0$) și de cunoaștere a legii de variație pe verticală a secțiunii transversale $S(z)$ a rezervorului, permite obținerea relației de calcul a timpului de golire:

$$(3.126) \quad T_g = \frac{S(z)}{\mu A \sqrt{2g}} \int_{z_2}^{z_1} \frac{dz}{\sqrt{z}} = \frac{S(z)}{\mu A \sqrt{2g}} 2 (\sqrt{z_1} - \sqrt{z_2}),$$

sau

$$(3.127) \quad T_g = \frac{2S(z)\sqrt{z}}{\mu A \sqrt{2g}} = \frac{2S(z)H}{\mu A \sqrt{2g} \sqrt{H}} = \frac{2 \cdot \text{Vol}}{Q_{aj}}$$

pentru golirea printr-un ajutoraj, respectiv

$$(3.128) \quad T_g = \frac{2S(z)H}{\varphi A_c \sqrt{2gH}} = \frac{2 \cdot \text{Vol}}{Q_c}$$

la golirea printr-o conductă scurtă.

În cazul rezervorului închis și aflat sub presiune constantă ($p_0 = \text{const.}$), sarcina totală H_t sub care are loc golirea se exprimă prin relația:

$$(3.129) \quad H_t = z + \frac{p_0}{\rho g}$$

Relația de calcul a timpului de golire se deduce astfel:

$$(3.130) \quad \begin{aligned} T_g &= \frac{S(z)}{\varphi A \sqrt{2g}} \int_{z_2}^{z_1} \frac{dz}{\sqrt{z + \frac{p_0}{\rho g}}} \\ T_g &= \frac{S(z)}{\varphi A \sqrt{2g}} \cdot 2 \left(\sqrt{z_1 + \frac{p_0}{\rho g}} - \sqrt{z_2 + \frac{p_0}{\rho g}} \right) \end{aligned}$$

iar prin considerarea relației (3.129) în cazul folosirii unei conducte hidraulic scurte, rezultă:

$$(3.131) \quad T_g = \frac{2S(z)H_t}{\varphi A_c \sqrt{2gH_t}} = \frac{2 \cdot \text{Vol}}{Q_c}$$

În cazul rezervorului aflat sub o presiune variabilă se admite că în timpul golirii presiunea din perna de aer scade corespunzător

unei transformări izoterme. Pentru exprimarea sarcinii conductei, definită prin relația,

$$(3.132) \quad H_t = z + \frac{p}{\rho g}$$

trebuie cunoscută legea de variație a presiunii p în perna de aer a rezervorului (în scară manometrică).

3.5. ELEMENTE DE CALCUL HIDRAULIC LA INSTALAȚIA REZERVOARELOR DE ÎNMAGAZINARE A APEI RECI

3.5.1. Considerații generale

Instalația hidraulică pentru rezervoarele de acumulare a apei reci prezintă o complexitate structurală în funcție de rolul rezervorului în cadrul schemei de alimentare cu apă. Instalația cuprinde o serie de componente și subansamble cu grade diferite de complexitate, conform funcției acestora în cadrul procesului de exploatare. Principalele componente ale instalației sunt (fig. 3.37):

- conducta sau conductele de alimentare a rezervorului;
- conductele de trimitere a apei la nodurile de distribuție;
- conducta de ocolire a rezervorului;
- conductele de aspirație a pompelor;
- conducta de preaplin;
- conducta de golire;
- conducta de racord la pompele mobile de incendiu (PSI);
- conducta de evacuare de la pompa amplasată în bașă etc.

În cazul rezervoarelor cu stații de pompare adoste, instalația hidraulică se particularizează pentru alimentarea pompelor și a modulelor cu hidrofor, precum și pentru distribuția la consumator etc (fig.3.38) [27]. La rezervoarele cuplate se prevede o conductă de egalizare racordată la aspirația conductei de distribuție și care este dotată cu un robinet aflat în poziția *normal deschis*. Traseul de pozare a conductelor de racord se alege în funcție de condițiile oferite de amplasament și construcție.

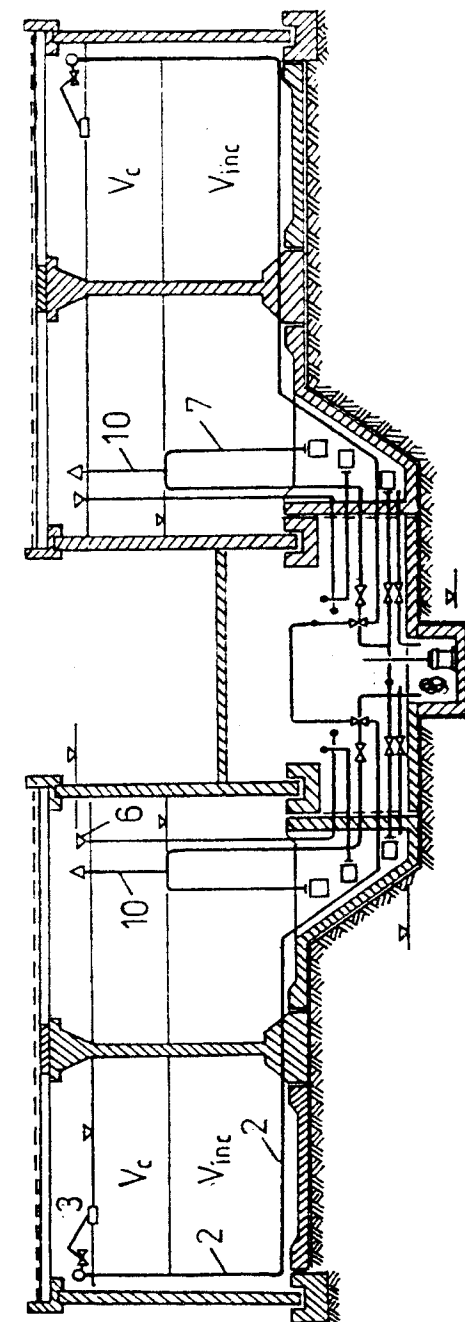


Fig. 3.37. a. Instalația hidraulică la două rezervoare cuplate în paralel (secțiune transversală).

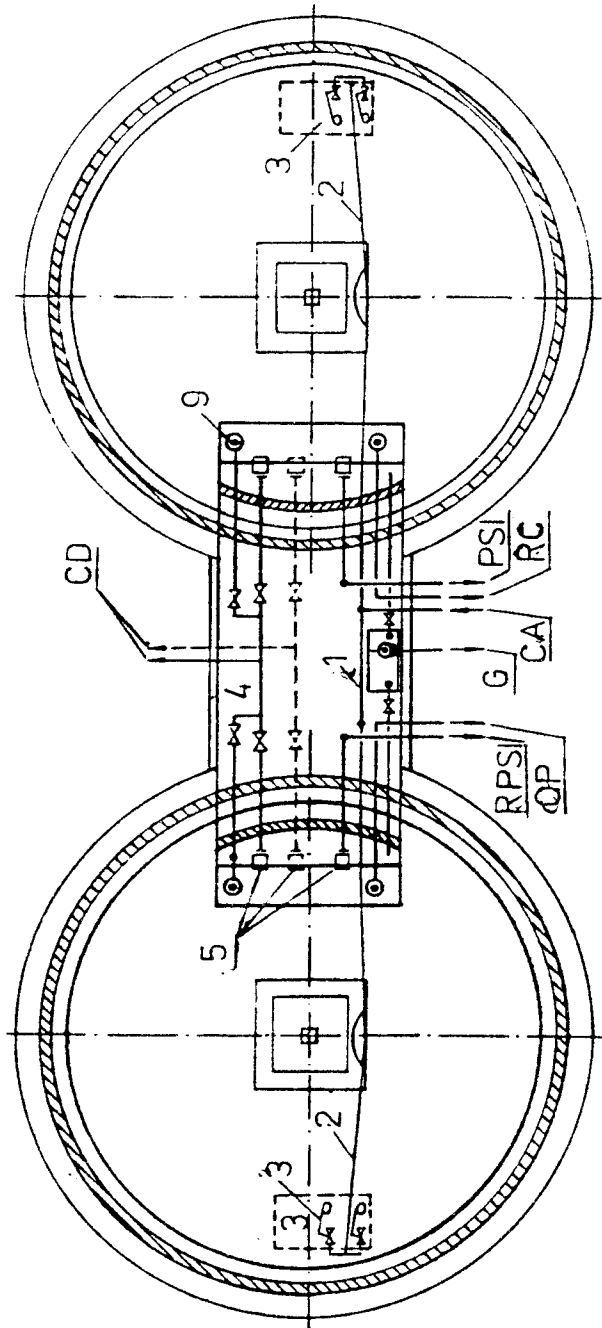


Fig. 3.37. b. Instalația hidraulică la două rezervoare cuplate în paralel (vedere în plan).

Fig.3.37. Instalația hidraulică pentru o distribuție gravitațională la două rezervoare cuplate în paralel: a – secțiune transversală; b – vedere în plan; CA – conductă de alimentare; G – conductă de golire; CP – conductă de preaplin; CD – conductă de distribuție; RC – racord conducte; R.PSI – racord PSI; V_c – volum pentru consum; V_{inc} – volumul pentru rezerva intangibilă de incendiu; 1 – tronsonul comun al conductei de alimentare; 2 – tronsonul CA în cuva rezervorului; 3 – robinet de colț cu ventil și plutitor; 4 – tronsonul comun al conductei de distribuție; 5 – sorb cu flanșe; 6 – pâlnia conductei de preaplin; 7 - aspirația conductei de distribuție pentru păstrarea rezervei intangibile de incendiu; 8 – pompă de epuismen; 9 – piesă de trecere; 10 - conductă de dezamorsare.

Rezervoarele sunt prevăzute cu aparate și instalații de monitorizare a parametrilor funcționali, precum și de automatizare a funcționării instalației hidraulice.

La rezervoarele care includ volume de apă pentru incendiu, instalațiile hidraulice trebuie să fie astfel proiectate, încât să nu permită consumarea acestui volum decât în scopul pentru care a fost prevăzut. De asemenea, rezervoarele vor fi echipate cu conductele necesare pentru alimentarea cu apă a pompelor mobile de incendiu (racord PSI). La proiectarea instalației hidraulice se vor respecta normele generale de protecție împotriva incendiilor.

Conductele care compun instalația hidraulică aferentă rezervoarelor de acumulare vor fi echipate cu robinete. O excepție este reprezentată de conducta de preaplin, care nu se prevede cu nici o armătură de reținere sau reglare a debitului. Dacă volumul de acumulare este stocat într-un singur rezervor, se va prevedea posibilitatea ocolirii acestuia, pentru a crește siguranța în exploatare a sistemului.

Proiectele tip ale rezervoarelor indică varianta maximă de proiectare a componentelor instalației hidraulice și au un caracter directiv în general. Adaptarea proiectului la condițiile locale de amplasare și funcționare poate impune modificarea instalației hidraulice. Proiectantul va avea în vedere respectarea axelor golurilor de trecere prin peretele rezervorului.

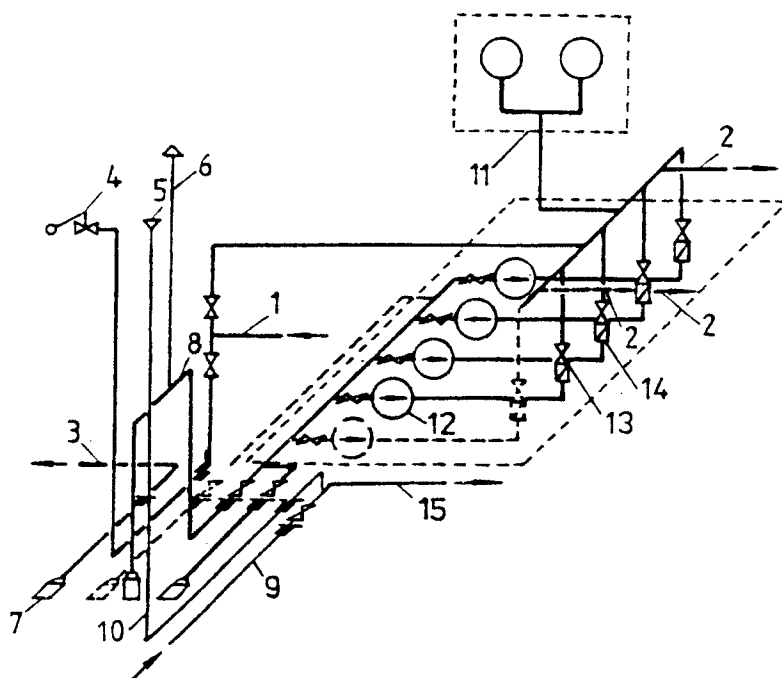


Fig. 3.38. Instalația hidraulică la un rezervor cu distribuție prin pompare (schema izometrică): 1 – alimentare; 2 – distribuție; 3 – racord PSI; 4 – distribuitor cu robinet cu plutitor; 5 – pâlnia preaplinului; 6 – conductă de dezamorsare; 7 – sorb; 8 – conductă de aspirație; 9 – golire; 10 – conductă de preaplin; 11 – baterie de hidrofoare; 12 – pompă; 13 – robinet; 14 – clapet; 15 – la canalizare.

3.5.2. Conducta de alimentare a rezervorului. Dimensionarea robinetelor cu plutitor

Alimentarea rezervorului se realizează prin intermediul unei conducte racordată în punctul de branșament la rețeaua exterioară a sistemului de alimentare cu apă (fig. 3.39). În cazul rezervoarelor cuplate, conducta de alimentare se împarte în ramuri simetrice, câte una pentru fiecare cuvă. La branșamentul cu rețeaua sistemului de alimentare cu apă se prevede un cămin cu

robinet de concesie și un cămin apometru [16]. Conducta de alimentare este prevăzută cu un robinet montat în secțiunea de intrare în rezervor, pentru închiderea admisiei apei; de asemenea, fiecare ramură de alimentare se dotează cu un robinet pentru închiderea independentă a fiecărui rezervor [25].

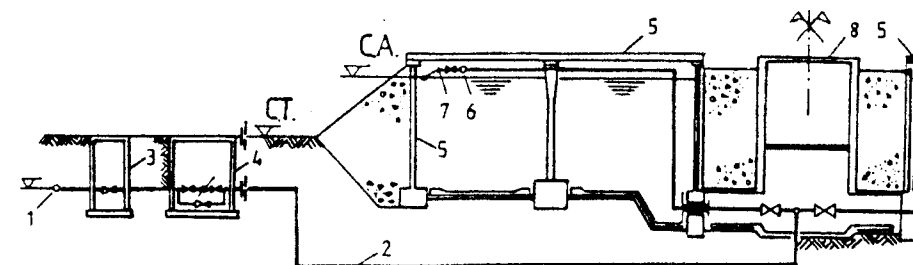


Fig. 3.39. Schema de calcul pentru conducta de alimentare a rezervoarelor de înmagazinare a apei reci: 1 – branșament la rețeaua sistemului; 2 – conductă de alimentare; 3 – cămin de robinet de concesie; 4 – cămin de apometru; 5 – rezervor; 6 – distribuitor; 7 – robinet cu plutitor.

Conducta se dimensionează la debitul $Q_{zi,max}$ preluat din nodul de racord sau păstrează diametrul aducțiunii în cazul în care se alimentează numai rezervorul. Calculul se efectuează prin folosirea graficelor prezentate în Anexe pe materialele de execuție. Pierderile de sarcină sunt de tip distribuit și local (robinet de concesie, apometru, robinete de trecere, coturi, modificări de diametru etc) și se determină cu relațiile de calcul specifice.

Conducta de alimentare traversează interiorul cuvei, la nivelul radierului, iar în partea opusă bazei se ridică pe perete, pînă la cota $H_{g,rob}$, unde se realizează emisia apei prin intermediul unui distribuitor.

Distribuitorul se dotează cu minim două - trei racorduri pe care sunt montate robinetele de colț cu ventil și plutitor. În acest mod se realizează o mai bună distribuție și circulație a apei în rezervor. Parametrii de calcul ai robinetelor cu plutitor sunt [23]: diametrul – D_r , debitul – Q_r , sarcina utilă – H_u , pierderile de sarcină locale – h_l , înălțimea geodezică la care este amplasat robinetul cu

plutitor față de punctul de racord la rețeaua exterioară al conductei de alimentare cu apă a rezervorului - $H_{g,rob}$. Debitul Q_r , care intră în cuva rezervorului prin intermediul unui robinet cu plutitor de diametru D_r se calculează cu relația:

$$(3.133) \quad Q_r = A_r \cdot v_r,$$

sau

$$(3.134) \quad Q_r = \varphi A_r \sqrt{2gH_u},$$

în care v_r este viteza medie a apei în secțiunea robinetului cu plutitor; A_r - aria secțiunii de curgere a robinetului; φ - coeficientul de viteză; H_u - sarcina utilă în secțiunea robinetului. Pentru calculul coeficientului de viteză φ al robinetului se folosește relația:

$$(3.135) \quad \varphi = \frac{1}{\sqrt{\alpha + \zeta_r}},$$

unde ζ_r reprezintă coeficientul de rezistență locală a robinetului cu plutitor.

Prin înlocuirea parametrilor cunoscuți în ecuația (3.133), rezultă expresia de calcul pentru debitul robinetului:

$$(3.136.a) \quad Q_r = 0,785 D_r^2 \sqrt{\frac{2gH_u}{1 + \zeta_r}}, \quad (\text{m}^3/\text{s}),$$

sau

$$(3.136.b) \quad Q_r = 2826 D_r^2 \sqrt{\frac{2gH_u}{1 + \zeta_r}}, \quad (\text{m}^3/\text{h}).$$

Numărul robinetelor cu plutitor, n , se calculează din relația de continuitate aplicată la intrarea în distribuitor:

$$(3.137) \quad Q_{al} = n \cdot Q_r,$$

de unde

$$(3.138) \quad n = \frac{Q_{al}}{Q_r}$$

în care Q_{al} este debitul de alimentare a rezervorului. Prin calcul se poate alege numărul n al robinetelor cu plutitor, situație în care din

relația (3.138) se obține debitul unui robinet, iar din relația (3.136.a sau b) rezultă diametrul robinetului cu plutitor. Valoarea obținută trebuie corelată cu valorile standardizate și prezentate în prospectele firmelor care produc astfel de echipamente.

Sarcina utilă H_u depinde de parametrii geometrici și hidraulici din secțiunea de amplasare a robinetului. Relația de calcul are forma:

$$(3.139) \quad H_u = H_{disp} - (H_{g,rob} + h_r)$$

unde H_{disp} este sarcina hidrodinamică disponibilă a apei în punctul de racord al conductei de alimentare a rezervorului la rețeaua exterioară; h_r - pierderile de sarcină totale pe conducta de alimentare cu apă a rezervorului între punctul de racord și robinetul cu plutitor.

3.5.3. Conducta de preaplin

Conducta de preaplin are rolul de a păstra volumul și nivelul apei proiectat în rezervor; de asemenea, are rolul de a proteja rezervorul la creșteri accidentale de nivel a apei, în cazul defectării robinetelor din dotarea distribuitorului (fig. 3.37). Conducta de preaplin se dimensionează la debitul maxim zilnic ($Q_{zi,max}$). Diametrul calculat trebuie să fie cel puțin egal cu diametrul conductei de alimentare sau se va adopta o valoare mai mare decât acesta, respectiv de 1,25...1,5 ori.

Instalația de preaplin este alcătuită dintr-un vas prismatic sau tronconic (vas de preaplin), racordat la o conductă de diametru D_p cu poziție verticală în rezervor și care se continuă cu o conductă cvasi-orizontală, cu funcția de a descărca apa în rețeaua de canalizare sau într-un emisar (fig.3.40). În cazul defectării unui robinet cu plutitor de debit Q_r , preaplinul evacuează volumul de apă suplimentar ΔV , de înălțime Δh , care se acumulează în rezervor. Vasul de preaplin prezintă o funcționare neînecată sau înecată, în funcție de mărimea sarcinii Δh .

Ecuația de continuitate a conductei de preaplin, pentru evacuarea volumului suplimentar de apă, se scrie sub forma:

$$(3.140) \quad \Delta V = Q_r \cdot t_e,$$

în care

$$(3.141) \quad \Delta V = A_R \cdot \Delta h,$$

de unde rezultă timpul de evacuare t_e :

$$(3.142) \quad t_e = \frac{\Delta V}{Q_r}.$$

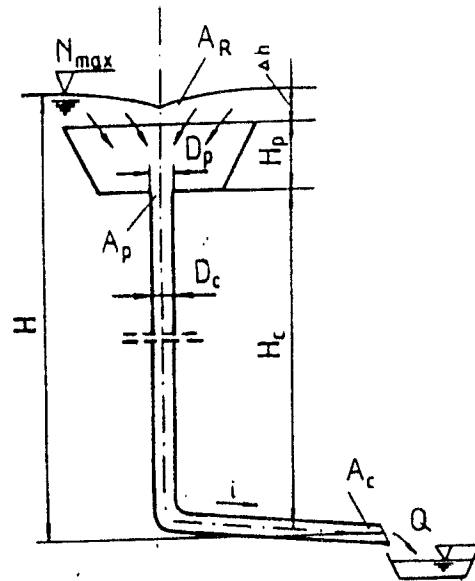


Fig. 3.40. Schema de calcul la conducta de preaplin.

În detaliu, pentru o instalație completă de preaplin, timpul de evacuare este compus din următoarele componente:

- timpul de golire pentru volumul suplimentar de apă apărut în rezervor, t_s ;
- timpul de golire a vasului de preaplin, t_p ;
- timpul de golire a conductei de preaplin, t_c .

Conform schemei de calcul din figura 3.40 și a celor enunțate în cap. 3.4, rezultă [19]:

$$(3.143) \quad t_e = t_s + t_p + t_c,$$

în care fiecare termen se exprimă sub forma

$$(3.144) \quad t_s = \frac{2L_c}{\mu_{0,1} \sqrt{2g} \left(\sqrt{\Delta h} + \sqrt{\Delta h - \frac{A_p}{A_{v,p}} L_{c,p}} \right)},$$

$$(3.145) \quad t_p = \frac{2V_p}{\mu_{0,2} A_c \sqrt{2gH_p}},$$

$$(3.146) \quad t_c = \frac{2V_c}{\varphi A_c \sqrt{2gH_c}},$$

unde A_p și D_p sunt aria, respectiv diametrul conductei de golire a vasului de preaplin; A_c , D_c - aria, respectiv diametrul conductei de preaplin în secțiunea de emisie (în caz particular, $A_p = A_c$); $A_{v,p}$ - aria transversală a vasului de preaplin; μ_0 - coeficientul de debit al orificiului vasului de preaplin; φ - coeficientul de viteză al conductei de preaplin; L_c - lungimea totală a conductei de preaplin; V_p - volumul vasului de preaplin; V_c - volumul conductei de preaplin.

Coeficientul de debit $\mu_{0,1}$ se consideră cu valoarea sa medie pentru forma geometrică a orificiului considerat și modul său de funcționare. Coeficientul $\mu_{0,2}$ se calculează cu relația generală:

$$(3.147) \quad \mu_{02} = \frac{1}{\sqrt{1 + \sum \frac{\lambda L_c}{D_p} \left(\frac{A_c}{A_p} \right)^2 + \sum \zeta \left(\frac{A_c}{A_p} \right)^2}},$$

unde λ este coeficientul de rezistență liniară al conductei de preaplin; $\sum \zeta$ - suma coeficienților de rezistență locală pe conducta de evacuare a preaplinului.

Coeficientul de viteză φ se determină în funcție de parametrii geometrici și hidraulici ai conductei de evacuare, relația generală de calcul fiind:

$$(3.148) \quad \varphi = \frac{1}{\sqrt{1 + \sum \frac{\lambda L_c}{D_c} + \sum \zeta}}.$$

Prin egalarea relațiilor (3.142) și (3.143), în cazul cunoașterii ariei secțiunii transversale a rezervorului A_R , sarcinii suplimentare Δh , debitului robinetului cu plutitor Q_r , rezultă o ecuație care permite determinarea parametrilor geometrici ai secțiunii de racord "vas preaplin – conductă de preaplin", respectiv diametrul D_p , sau A_p . Valoarea sarcinii Δh se impune din condiții constructive și de funcționare a deversorului vasului de preaplin.

La capătul aval al conductei de descărcare se prevede un recipient cu grătar, pentru punerea în evidență a pierderilor de apă în cazul unei defecțiuni a robinetelor cu plutitor. Grătarul poate fi înlocuit cu o sită cu ochiuri de 1 cm. În cazul rezervoarelor pentru apă potabilă nu se admite descărcarea conductei de preaplin în canalizări de ape uzate. De asemenea, vor fi luate măsuri constructive ca prin evacuarea volumelor de apă să nu fie aduse prejudicii terenurilor și obiectivelor din zonă.

3.5.4. Dimensionarea conductei de golire. Timp de golire

Conducta de golire este amplasată în camera vanelor și este racordată la bașa executată în cuva rezervorului (fig. 3.37 și 3.41). Conducta trebuie să asigure evacuarea apei din rezervor într-un interval de timp determinat sau, în funcție de condițiile locale, se impune un timp de golire de circa 6 ... 8 ore.

Pe conducta de golire se montează o armătură de închidere și reglare a debitului (de obicei se prevede un robinet tip fluture).

Parametrii principali de dimensionare sunt debitul, diametrul și timpul de golire, în condiția cunoașterii celorlalți parametri geometrici și hidraulici (lungime, rugozitate, cote de amplasare etc).

Variantele de calcul sunt multiple și se aleg în funcție de datele cunoscute: volumul de apă ce urmează a fi evacuat, caracteristicile de amplasament, condițiile locale de evacuare prezența unui emisar etc. Dacă se cunoaște volumul rezervorului, Vol , și caracteristicile conductei de golire (diametrul, coeficientul de viteză φ , cota geodezică H_g), calculul timpului de golire rezultă din relația (3.128), scrisă sub forma:

$$(3.149) \quad T_g = \frac{2S(z) H_g}{\varphi A_c \sqrt{2gH_g}} = \frac{2 \cdot Vol}{Q_c}$$

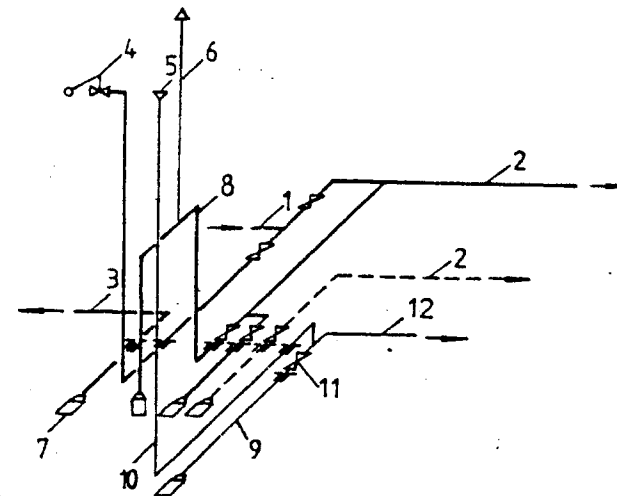


Fig. 3.41. Instalația hidraulică la un rezervor cu distribuție gravitațională (schema izometrică): 1 – alimentare; 2 – distribuție; 3 – racord PSI; 4 – distribuitor cu robinet cu plutitor; 5 – pâlnia preaplinului; 6 - conductă de dezamorsare; 7 – sorb; 8 – conducta de aspirație; 9 – golire; 10 – conductă de preaplin; 11 – robinet; 12 – la canalizare

Dacă se adoptă un timp de golire T_g , în funcție de condițiile de preluare a debitului evacuat, rezultă debitul Q_c și diametrul conductei de golire. Dacă se impune mărimea debitului Q_c , se determină diametrul conductei de golire D_c , pentru o viteză admisă de natura materialului din care este executată conducta; tot odată rezultă timpul de golire.

La descărcarea în emisar se vor respecta condițiile impuse conductei de preaplin. Respectiv, se vor lua măsuri constructive pentru evitarea prejudiciilor produse prin inundarea terenurilor sau obiectivelor din zonă. În cazul rezervoarelor de apă potabilă nu se admite descărcarea conductei de golire în canalizări de ape uzate. Conducta de golire va fi prevăzută la ieșire cu o sită cu ochiuri de 1 cm pentru protecția circuitului hidraulic.

3.6. ELEMENTE DE CALCUL PENTRU INSTALAȚIA DE POMPARE AFERENTĂ REZERVOARELOR DE ACUMULARE A APEI RECI

3.6.1. Considerații generale

O instalație de pompare reprezintă un ansamblu de echipamente hidromecanice (bază + auxiliare) și construcții hidrotehnice, care împreună cu instalațiile electrice și cele de automatizare, au ca scop vehicularea volumelor de apă ce urmează să satisfacă cerințele diferite ale consumatorilor.

Stația de pompare prezintă o structură diferențiată după funcția sa în cadrul sistemului de alimentare cu apă (repompare, punere sub presiune, incendiu, etc), respectiv în cadrul instalației hidraulice aferente rezervorului de înmagazinare. Structura de ansamblu este impusă de modul de preluare a apei, parametrii funcționali care trebuie asigurați (debite, presiuni), caracteristicile instalațiilor hidromecanice de bază și auxiliare, modul de exploatare, gradul de automatizare etc.

3.6.2. Structura stației de pompare

3.6.2.1. Linia tehnologică interioară a stației de pompare

Îndeplinirea funcției de bază, precum și a celor auxiliare se realizează de către stația de pompare prin folosirea unui ansamblu de utilaje și instalații, care conlucrează între ele după anumite reguli, datorită interconectării lor într-o structură funcțională adecvată.

Reprezentarea simplificată a structurii funcționale reprezintă *schema tehnologică interioară a stației de pompare* [5]. Aceasta cuprinde liniile tehnologice de bază, instalații auxiliare, sisteme de control, comandă și automatizare etc. (fig.3.42).

Liniile tehnologice de bază ale stației de pompare sunt formate din agregatele de pompare (ansamblul pompă + motor) împreună cu conductele de aspirație și cele de refulare. Aceasta poate fi echipată cu unul sau mai multe agregate de pompare, cuplate în serie sau paralel (fig.3.43), în funcție cu debitul nominal al pompelor și poziția relativă a stației față de consumatorul deservit. O stație de pompare poate fi echipată cu una sau mai multe linii tehnologice de bază, în funcție de cerințele sistemului hidraulic, sau ale consumatorului și în corelare cu caracteristicile funcționale ale agregatului de pompare utilizat.

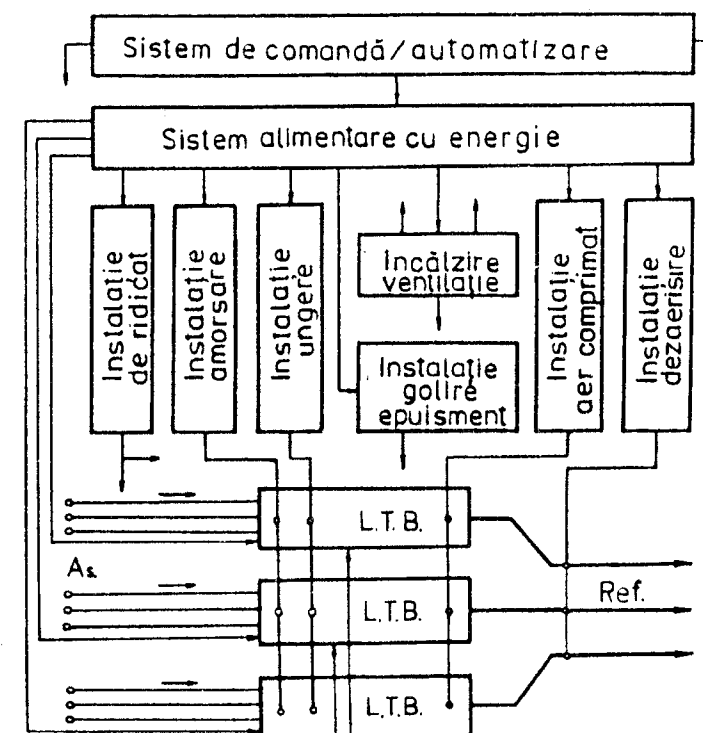


Fig. 3.42. Schema tehnologică interioară a unei stații de pompare.

Linia tehnologică de bază prezintă următoarele componente principale (fig.3.43):

- agregat de pompare (pompa – 1, motor de antrenare - 10);
- piese de aspirație montate la intrarea în conducta de aspirație (2);
- conducta de aspirație propriu-zisă (3);

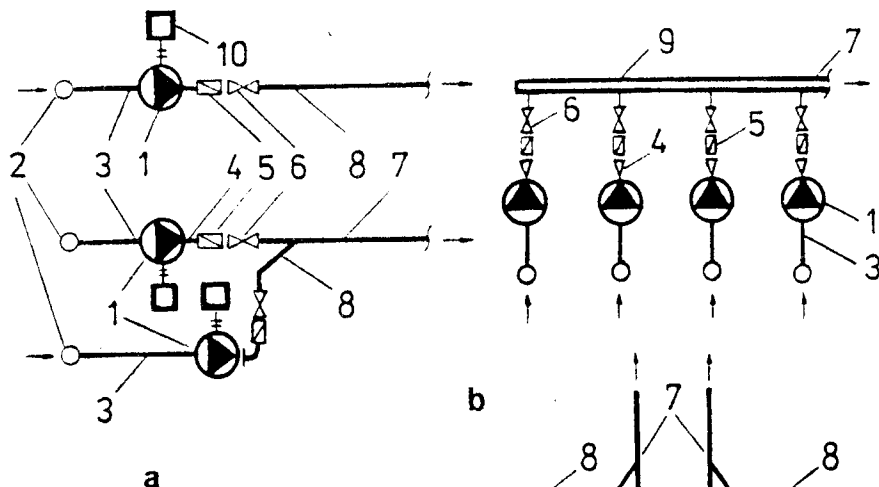


Fig. 3.43. Modul de grupare a liniilor tehnologice de bază:
a – pompă cu aspirație și refulare individuală; b și d – pompe cuplate în paralel.

- difuzor montat pe conducta de refulare interioară a pompelor (4);
- clapet de reținere montat pe conducta de refulare interioară (5);
- robineti de închidere și reglaj pe refularea interioară (6);
- conducte de refulare individuale și ramificații de îmbinare a curenților din rețeaua interioară (8);
- colectorul conductelor de refulare din rețeaua interioară (9);
- conducta de refulare a stației de pompare (rețeaua exterioară - 7).

Amplasarea liniilor tehnologice de bază pe verticala stației de pompare este condiționată de prevenirea apariției fenomenului de cavitație, respectiv a vortexului cu antrenare de aer. Amplasarea în plan a liniilor tehnologice de bază se realizează în urma unui studiu de analiză tehnologică și funcțională, care să prevadă printre altele și asigurarea unor condiții favorabile la aspirație și refulare.

3.6.2.2. Agregatele de pompare

Elementul principal al liniei tehnologice de bază este constituit din agregatul de pompare. Rolul acestuia este de a transforma energia mecanică, consumată de motor, în energie hidraulică, care este cedată de către pompă fluidului prelucrat. **Agregatele** sunt alcătuite din **generatorul hidraulic** (pompa), **motorul** care îl antrenează și un **sistem de transmisie** a puterii mecanice de la motor la pompă (un cuplaj realizat cel mai adesea de tip elastic). Agregatele de pompare pot fi cu ax orizontal sau cu ax vertical, în simplu flux sau dublu flux etc (fig.3.44).

Pompele se aleg pe considerente tehnico-economice și în funcție de oferta pieții. Numărul pompelor în stație variază, în funcție de modul de asigurare a variației parametrilor funcționali solicitați de sistemul deservit și în baza unor considerente economice. În general se folosesc 2..8 pompe la echiparea stațiilor pentru alimentare cu apă [5], [15]. În situația folosirii unor pompe, care au motoare cu turație variabilă, numărul acestora poate fi micșorat [15].

Motorul de antrenare se alege în condiția obținerii caracteristicilor funcționale optime ale pompei. Motoarele sunt de de tip electric, de cele mai multe ori, dar pot fi și termice pentru anumite situații funcționale. Dacă puterea motoarelor este sub 200 kW ele funcționează la tensiunea de 220-380 V. Dacă puterea de antrenare depășește 200-300 kW, tensiunea de alimentare va fi de 6000 V [5], [18].

Puterea nominală a motorului nu trebuie să depășească cu 5-15% puterea absorbită de pompă în regimul cel mai nefavorabil de lucru. Puterea pompei se determină pentru regimul cel mai

nefavorabil de funcționare a agregatului, care poate lucra independent, sau în formație, cunoscând parametrii specifici de exploatare, Q_p , H_p , η_p .

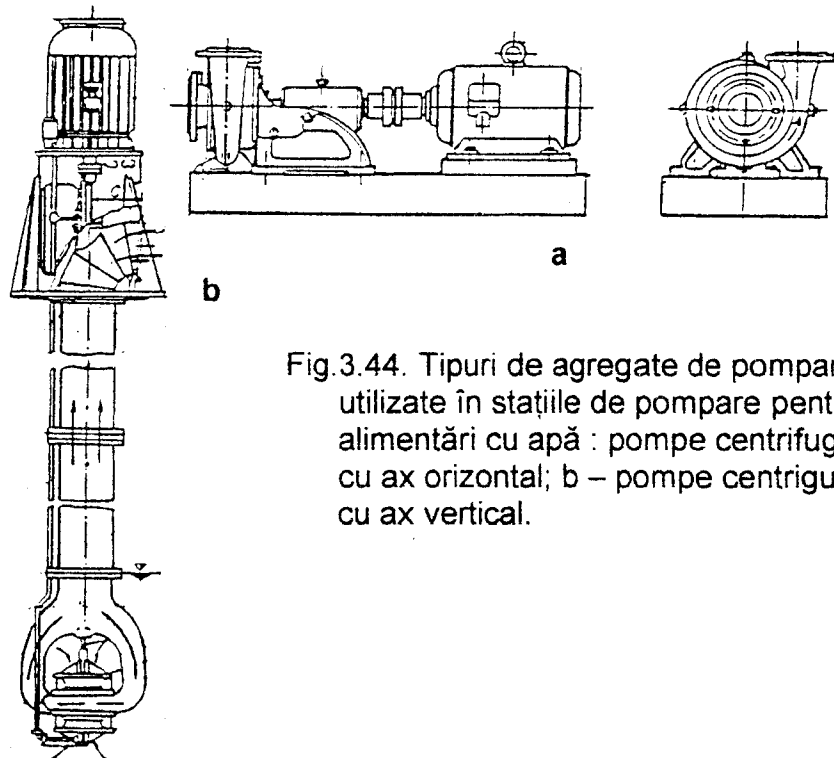


Fig. 3.44. Tipuri de agregate de pompare utilizate în stațiile de pompare pentru alimentări cu apă : pompe centrifugale cu ax orizontal; b – pompe centrifugale cu ax vertical.

Deoarece în exploatare pot interveni situații neprevăzute, datorită modificărilor condițiilor inițiale de funcționare și care pot provoca suprasarcini suplimentare este recomandabil să se aleagă un motor cu o rezervă de putere care să facă față solicitărilor.

3.6.2.3. Instalațiile hidraulice de bază și auxiliare

Instalațiile hidraulice din structura liniei tehnologice de bază sunt formate din două circuite (fig. 3.45) [5], [17]:

- **circuitul de aspirație**, prin care apa ajunge la pompă;
- **circuitul de refulare**, prin care apa este trimisă spre rețeaua de distribuție, rezervor, bazin de refulare etc.

Ambele circuite sunt realizate în stația de pompare prin folosirea țevelor din metal, îmbinate prin flanșe și suduri. Elementele constructive ale circuitului hidraulic trebuie să permită o montare și demontare rapidă.

Conducta de aspirație este individuală pentru fiecare pompă, pentru asigurarea curgerii normale a curentului de fluid, în condițiile evitării apariției fenomenelor negative (cavitație, vortex, pierderi de sarcină majorate etc.). În anumite cazuri pot fi prevăzute conducte de aspirație comune, cu un singur fir, când această situație devine rațională din punct de vedere funcțional. Conducta de aspirație are o structură diferențiată după poziția pompei față de nivelul apei la aspirație: neînecat și înecat. La capătul conductei de aspirație este prevăzut un sorb cu flanșe ales în concordanță cu tipul pompei și modul de funcționare. Cuplarea conductei de aspirație la pompă se realizează prin intermediul unui confuzor asimetric.

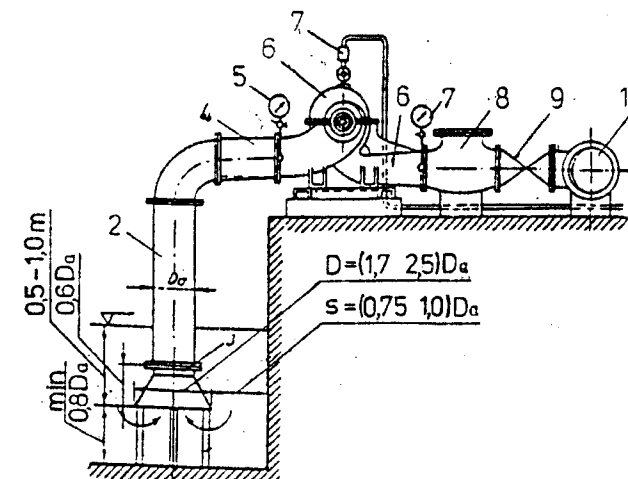


Fig. 3.45. Instalația hidraulică de pe linia tehnologică de bază: 1 – pompă; 2 – conductă de aspirație 3 – sorb; 4 – confuzor asimetric 5 - vacuometru; 6 – difuzor; 7 – manometru; 8 – clapet; 9 – robinet; 10 – conductă de refulare; 11 – circuit de amorsare.

Conducta de refulare din linia tehnologică interioară este proprie fiecărei pompei până la colectorul de refulare.

În cazul pompelor centrifuge, pe conducta de refulare interioară sunt montate în serie, cu începere de la flanșa de refulare următoarele piese: difuzor (6), clapet de reținere (8), robinet de închidere și reglaj a debitului (9), fittinguri de cuplare la colectorul de refulare (fig.3.45).

Instalațiile auxiliare din dotarea stației de pompare sunt următoarele [5], [17]:

a - instalația de epuismenț și golire, dotată cu un circuit hidraulic propriu deservit de o pompă de epuismenț dimensionată la parametrii corespunzători;

b - instalația de amorsare a pompelor, care poate fi de tip manual, sau realizată cu ajutorul pompelor de vacuum; la rândul lor, pompele de vacuum necesită un circuit special de alimentare și evacuare (conducte, rezervoare, sisteme de control - blocaj - comandă etc fig.3.46);

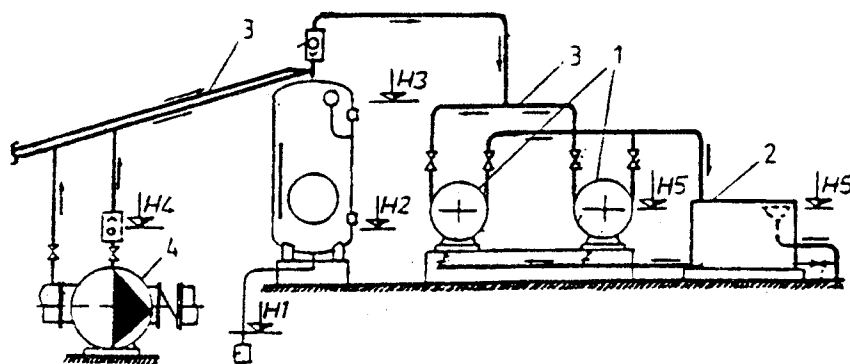


Fig.3.46. Schema instalației de amorsare: 1 – pompe de vacuum; 2 – rezervor de apă; 3 – circuitul hidraulic de amorsare; 4 – agregat de pompare.

c - instalația de ungere a pompelor, realizată în funcție de fluidul folosit (ulei sau apă); în structura instalației intră pompe, rezervoare pentru fluidul de ungere, filtre, conducte, armături fittinguri, dispozitive de comandă și control etc;

d - instalația de răcire, care în unele cazuri este cuplată cu instalația de ungere;

e - instalația de debitmetrie, care se montează într-o secțiune determinată pe conducta de refulare și are posibilitatea transmisiei în mod automatizat a parametrilor la un centru de comandă; instalația se particularizează după dimensiunile conductelor, tipul debitmetrelor și accesoriilor, poziția de montaj, valoarea parametrilor de măsurare, precizia dorită etc;

f - instalația de măsurare a parametrilor apei din bazinele de aspirație și refulare, precum și a celor specifici agregatelor de pompare;

g - instalațiile de protecție la șocul hidraulic, care sunt realizate în funcție de gradul de protecție calculat; șocul hidraulic poate fi limitat parțial, prin utilizarea unor dispozitive și armături diverse pentru suprapresiuni și subpresiuni, sau poate fi limitat total, prin folosirea rezervoarelor cu pernă de aer- hidrofoare, castele de echilibru etc.

Fiecare instalație auxiliară se particularizează după tipul pompelor, liniilor tehnologice interioare, gradul de dezvoltare al stației etc. După caz, unele instalații pot lipsi sau se pot dezvolta până la un grad de complexitate ridicat (ex. instalația de ungere cu apă a pompelor, situație în care apă trebuie să fie filtrată și de calitate corespunzătoare chimic etc.).

3.6.2.4. Instalații auxiliare

În cadrul stațiilor de pompare pentru alimentare cu apă potabilă se prevăd o serie de instalații auxiliare, care au rolul de a ajuta procesul de exploatare și de a crea condițiile de muncă adecvate personalului de deservire.

Principalele instalații auxiliare existente în dotarea stațiilor de pompare sunt [5], [17]:

1 - instalații de ridicat și transportat, manipulat etc utilizate la montarea, repararea și revizia agregatelor de pompare, precum și a altor ansamble funcționale din dotarea stației;

2 - instalații de încălzire, particularizate după locul în care trebuie asigurate anumite temperaturi necesare operațiilor tehnologice sau realizării condițiilor de lucru pentru (camera de comandă, spații sociale, ateliere, depozite, sala pompelor etc.);

3 - instalații de ventilare, folosite la stațiile de pompare unde nu se poate asigura ventilarea naturală;

4 - instalații de aer comprimat pentru alimentarea hidrofoarelor și în scopuri tehnologice ;

5 - instalații pentru stingerea incendiilor;

6 - instalații de paratrăsnet și legare la pământ etc.

Proiectarea instalațiilor auxiliare se realizează conform normelor și standardelor specifice fiecărui domeniu.

3.6.2.5. Instalații electrice

Instalațiile electrice ale stațiilor de pompare asigură funcționarea la parametri optimi a echipamentelor hidromecanice de bază, auxiliare, precum și a celorlalte circuite, aparate și dispozitive care deservește procesul de exploatare. Instalațiile de acest tip sunt grupate astfel [5]:

1 - instalații electrice de forță (transport, transformare și forță);

2 - instalații de iluminat interior și exterior;

3 - instalații de măsură, control și automatizare;

4 - instalații de compensare a puterii reactive;

5 - instalații pentru gospodăria de acumulatori;

6 - instalații de telesemnalizare, telecontrol și telecomandă;

7 - instalații de legare la pământ etc.

Stația de pompare reprezintă din punct de vedere energetic unul din cei mai importanți consumatori din cadrul unui sistem de alimentare cu apă.

Instalațiile de alimentare cu energie, până la bornele de ieșire ale transformatoarelor coborâtoare sunt, de obicei, proiectate, executate și exploatare de către furnizorul de energie. Puterea stațiilor sau a posturilor de transformare trebuie să fie acoperitoare pentru puterea maximă a consumatorilor prevăzuți, de obicei, cu simplă alimentare [5].

Instalațiile de la bornele de ieșire ale transformatoarelor la consumator (joasă sau medie tensiune) sunt dimensionate de institutul de proiectare cu profil pentru stațiile de pompare.

Instalațiile de forță ale stațiilor de pompare se compun din tablourile de distribuție, conductorii de legătură, aparatura de comutație etc. În funcție de puterea de alimentare se folosesc racorduri electrice adecvate (conductorii, bare de aluminiu etc.).

Instalațiile de forță la joasă tensiune cuprind: circuitul de ieșire la transformator, tabloul de măsură și sistemul de distribuție cu tablourile de alimentare ale electromotoarelor. Pentru puteri pe agregat sub 55 kW se folosesc tablouri formate din cutii capsulate. Pentru puteri unitare mai mari se utilizează tablouri montate în dulapuri metalice.

La stațiile de pompare alimentate în medie tensiune, pe circuitul de intrare de la transformator se montează celule de intrare echipate cu un întrerupător debroșabil. Soluțiile de alimentare se analizează de la caz la caz, având în vedere și împărțirea responsabilităților între cei care livrează energia și cei care exploatează stația de pompare.

În stațiile de pompare pentru alimentări cu apă, acționarea pompelor se realizează cu motoare electrice alimentate în curent alternativ. În funcție de tensiunea de alimentare se utilizează cel mai mult motoare de tip asincron. În cazul unor pompe cu puteri de antrenare foarte mari se folosesc motoare de tip sincron.

3.6.3. Utilajul de pompare.

3.6.3.1. Tipuri și clasificarea pompelor.

Pompa este o mașină care transformă energia mecanică, primită de la o sursă de antrenare, în energie hidraulică. Pompele pot fi clasificate după modul de funcționare sau după caracteristicile constructive. După principiul de funcționare (STAS 6868), pompele se clasifică astfel:

a - **pompe volumice**, care realizează vehicularea fluidului prin echivalare de volume; tipurile cele mai folosite sunt:

- *cu piston* (cu simplu sau dublu flux, sau cu efect) ;

- *rotitoare* (cu angrenaje, pală oscilantă, cu inel de lichid etc);

- *elevatoare* (cu lanț și cupe, vibratoare electromagnetice, șnec etc).

b - **turbo-pompe**, care vehiculează fluidul pe baza schimbului de energie turbionară, unde organul activ al pompei este rotorul; după modul de circulație a apei, pompele de acest tip se clasifică astfel:

- *pompe centrifuge*, iar în funcție de construcție și accesul apei pot fi monoetajate, bietajate, multietajate, în simplu sau dublu flux; de asemenea, pompele pot fi cu ax vertical sau orizontal etc;

- *pompe elicoidale*, care în funcție de construcție pot fi *diagonale* de tip normal sau rapid și *axiale* (normale);

c - **pompe speciale**, particularizate pentru diverse domenii (ex. pompele cu fluid motor sau hidro-elevatoare).

După natura presiunii creată în rețea, pompele pot fi de presiune (mică, medie, înaltă etc.) sau de vacuum.

Motorul de antrenare al pompei poate fi de tip electric (electropompe - modalitate preponderentă utilizată în stadiul actual), termic (motopompe), eolian etc.

După gradul de mobilitate, pompele pot avea o poziție fixă prin montarea batiului pe o fundație rigidă, sau pot fi mobile în cadrul construcției și instalației (ex. pompe de epuismen), sau mobile pe distanțe mari, prin atașarea lor la un mijloc de transport.

Pompele pot avea o turație constantă, dată de turația motorului de antrenare; prin schimbarea motorului se poate modifica turația pompei. De asemenea, pompele pot avea o turație variabilă dată de modul de antrenare, sau prin modificarea turației motorului realizată chiar în timpul funcționării [15].

Turbopompele, folosite frecvent în stațiile de pompare pentru alimentări cu apă, sunt formate din următoarele componente principale (fig. 3.47):

- pompa propriu-zisă, formată dintr-o parte mobilă (rotor), montată într-o carcasă (1), care este partea fixă și pe care se află cele două ștuțuri cu flanșe pentru aspirație (2) și refulare (3);

- motorul de antrenare, particularizat după tipul de energie folosită (4) și borna de alimentare (5);

- cuplajul (6) și arborele motor (7) de transmisie a puterii de la motor la pompă;

- lagărele de rezemare a arborelui motor (8);

- placa de bază (9) și buloanele de prindere în fundație (10), care folosesc la fixarea rigidă și centrarea motorului cu pompa; ansamblul pompă + electromotor la agregatele de dimensiuni mici este cuplat direct pe o placă metalică, care se fixează pe fundație, iar la agregatele de dimensiuni și puteri mari, componentele sunt livrate în mod separat.

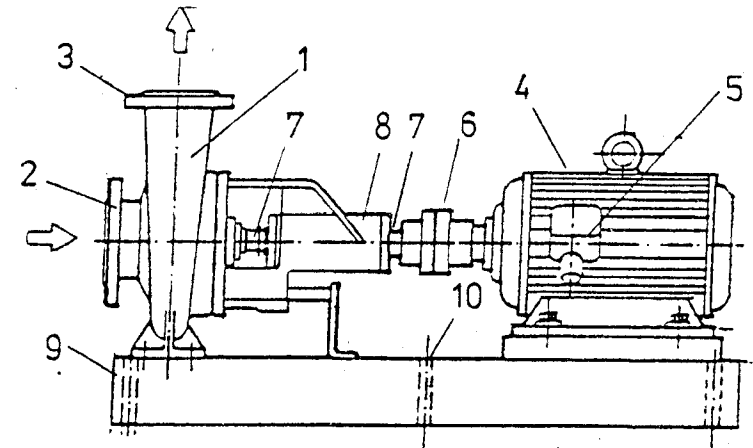


Fig. 3.47. Elemente componente la o pompă centrifugă.

În funcție de destinație și modul de alimentare cu energie, pompa poate prezenta și alte componente structurale și funcționale, după caz.

3.6.3.2. Parametrii de funcționare ai turbopompelor

Funcționarea pompelor este caracterizată printr-o serie de parametri, specifici regimurilor diferite de exploatare. Parametrii funcționali se determină prin măsurători directe pe pompa aflată în funcțiune, sau se calculează în funcție de datele experimentale obținute. Principalii parametri geometrici și hidraulici ai turbopompelor sunt: debitul, înălțimea (sarcina) de pompare, turația, turația specifică, puterea consumată, randamentul,

coeficienții de cavitație, dimensiunile rotorului și carcasei la aspirație și refulare etc.

Debitul agregatelor de pompare poate lua următoarele valori:

- *debitul volumic nominal*, Q_n , care reprezintă debitul de referință folosit la proiectarea pompei și corespunde turației nominale și înălțimii de pompare nominale;

- debit volumic aspirat, Q_{as} și debit volumic refulat, Q_r ;

- *debit volumic optim*, Q_{opt} , care reprezintă debitul corespunzător randamentului maxim când pompa funcționează la turația nominală;

- debit maxim, Q_{max} și minim, Q_{min} , care reprezintă debitele limită în funcționarea pompei.

Înălțimea de pompare sau sarcina de pompare (lucrul mecanic util transmis fluidului de către rotorul pompei) este exprimată sub forma unor înălțimi coloană apă, sau presiuni raportate la planul manometric. Se folosesc notațiile:

- H - *sarcina pompei*, H_1 sau H_{as} - *înălțimea de aspirație*, H_2 sau H_{ref} - *înălțimea de refulare*, exprimate în metri sau în bari etc.

Puterea pompelor se exprimă sub următoarele forme:

- *puterea utilă*, P_u , care este puterea transmisă de pompă fluidului vehiculat

$$(3.150) \quad P = \gamma Q H ;$$

- *puterea utilă nominală*, P_{un} , care este puterea utilă cu valoarea corespunzătoare parametrilor nominali

$$(3.151) \quad P_{un} = \gamma Q_n H_n ;$$

- *puterea absorbită*, P_p , care este puterea măsurată la arborele pompei

$$(3.152) \quad P_p = P_u / \eta_p$$

și poate fi corespunzătoare debitelor de funcționare, rezultând valorile P_n , P_{opt} , P_{max} , P_{min} etc.

Randamentul pompelor este diferențiat după secțiunea de calcul luată în ansamblul agregatului și se exprimă prin:

- *randamentul global*, η_p , este raportul dintre puterea utilă și cea absorbită la un anumit regim de funcționare,

$$(3.153) \quad \eta_p = P_u / P_p = \eta_m \eta_v \eta_h ;$$

- *randamentul mecanic*, η_m , ține cont de pierderile mecanice ale arborelui;

- *randamentul hidraulic*, η_h , ține cont de pierderile hidraulice în interiorul pompei;

- *randamentul volumic*, η_v , ține cont de pierderile de debit la presetupe etc.

Turația pompelor depinde de tipul motorului de antrenare. Turația pentru care a fost proiectată pompa se numește *turație nominală*, notată n_{nom} , iar celelalte valori utilizate în practică sunt: n_{min} , n_{max} , n_{opt} etc.

Parametrii de cavitație ai pompei sunt definiți prin **NPSH** și coeficienți de cavitație σ . Valorile folosite sunt următoarele:

- **NPSH_p**, sau *înălțimea energetică netă absolută* cerută la aspirație, a cărei valoare este dată de uzina producătoare a agregatelor de pompare;

- **NPSH_d**, sau *înălțimea energetică netă disponibilă* la aspirație, valoare calculată în funcție de caracteristicile instalației;

- *coeficientul de cavitație al pompei* σ_p ;

- *coeficientul de cavitație al instalației* σ_i ,

care sunt calculați cu relații specifice fiecărui caz [5], [7], [17].

3.6.3.3. Pompe utilizate în stațiile de pompare adosate rezervoarelor pentru înmagazinarea apei

Stațiile de pompare, din cadrul sistemelor de alimentare cu apă din România, sunt dotate în cea mai mare parte cu turbopompe de producție internă și parțial din import. De asemenea, pompele volumice folosite în instalațiile de amorsare, ungere, amestec etc sunt, în general, de producție internă.

Pompele utilizate pe liniile tehnologice de bază sunt de tip centrifugal și diagonal cu turație constantă. În marea lor majoritate stațiile de pompare pentru apă rece sunt dotate în stadiul actual cu următoarele tipuri de pompe [15], [19]:

- familiile de pompe LOTRU (L), CERNA (C), CRIȘ (CR) folosite pentru apă lipsită de impurități, până la temperatura de 105°C ; pompele sunt de tip centrifugal, monoetajat, cu ax orizontal și carcasă spirală, iar domeniul de folosire corespunde pentru $Q = 5 \dots 475 \text{ m}^3/\text{h}$ și $H = 3 \dots 55 \text{ mca}$;

- pompele AN sunt de tip centrifugal monoetajat, cu ax orizontal, aspirație axială, refulare radială și sunt destinate pentru apă curată; pompele AN au înlocuit parțial tipul L, C, CR în stațiile de pompare pentru apă potabilă;

- pompele SADU (S) sunt de tip centrifugal multietajat (2...15 rotoare puse în serie), cu ax orizontal și turație mare ($n = 2950 \text{ rot/min}$); pompele de acest tip se folosesc la ridicarea presiunii în vehicularea apei reci și calde cu $Q = 10 \dots 170 \text{ m}^3/\text{h}$ și $H = 20 \dots 800 \text{ mca}$;

- pompele NDS tip 4...14, cu $Q = 360 \dots 6200 \text{ m}^3/\text{h}$, $H = 44 \dots 96 \text{ mca}$ și tip 18...24 cu $Q = 1100 \dots 5400 \text{ m}^3/\text{h}$, $H = 27 \dots 88 \text{ mca}$, precum și tipul SIRET cu $Q = 400 \dots 7100 \text{ m}^3/\text{h}$, $H = 7 \dots 40 \text{ mca}$ sunt pompe centrifugale monoetajate, cu rotor în dublu flux, destinate vehiculării apei reci;

- familia de pompe HEBE, care sunt electropompe verticale, multietajate, cu funcționare submersibilă, sunt folosite la pomparea apei lipsită de impurități preluată direct din puțuri;

- pompele tip MV sunt de mare capacitate, de tip diagonal cu ax vertical, mono sau multietajate, cu $Q = 0,10 \dots 10 \text{ m}^3/\text{s}$, și $H = 12 \dots 120 \text{ mca}$; pompele sunt folosite la pomparea apei brute (în stații de pompare de bază) și tratate (stații de repompare).

În instalațiile hidraulice auxiliare ale stațiilor de pompare pentru apă potabilă se folosesc următoarele tipuri de pompe [5], [7]:

- pompe cu inel de lichid, de tip MIL, folosite la amorsarea pompelor cu aspirația neîncăcată; pompele realizează un vacuum de $30 \dots 760 \text{ torr}$ pentru $Q = 30 \dots 660 \text{ m}^3/\text{h}$, în funcție de numărul de etaje (rotoare);

- pompe tip ACV cu coloană verticală, pentru epuismențe în stația de pompare, cămine, rezervoare etc, folosite atât pentru apă curată, cât și pentru apă încărcată cu suspensii;

- pompe tip EPET și EPEG (variantă perfecționată a tipului EPET) folosite pentru epuismențe în cazul unor ape cu conținut important de suspensii; pompele sunt de tip centrifugal, cu rotor într-o construcție bloc și funcționează înecat.

- pentru asigurarea apei de ungere, preluată de obicei din foraje și având în vedere calitatea acesteia, se folosesc pompele tip HEBE, sau alte tipuri; dacă apa de ungere prezintă impurități se vor introduce în circuit filtre pentru protecția pompei; pentru ungerea cu ulei se utilizează pompe volumice.

O serie de pompe prezentate mai sus nu mai sunt fabricate, sau au fost înlocuite cu tipuri noi, modernizate și actualizate ca nivel tehnic.

În ultima perioadă de timp, pe piața românească a apărut o gamă diversă de pompe pentru apă potabilă. Unele dintre acestea, pe domeniul de folosire echivalent cu cele românești, prezintă parametri funcționali superiori, în special în privința randamentului și puterii necesare. Pot fi menționate aici pompele fabricate de firmele GRUNDFOS, VOGEL, DAB, etc.

Progresul științei și tehnicii actuale s-a materializat prin realizarea unor pompe performante cu turație variabilă și adaptabile pentru stațiile de pompare folosite în alimentări cu apă.

3.6.4. Curbele caracteristice turbopompelor

Modul în care se comportă pompele în diversele regimuri de exploatare este condiționat de cunoașterea caracteristicilor (curbelor) de funcționare ale acestora. Modificarea parametrilor Q , H , P , η la o turație constantă a pompei și pentru un diametru de rotor determinat, reprezintă caracteristica internă, principală, exprimată printr-o ecuație de forma [5], [17]:

$$(3.154) \quad F(Q, H, P, \eta, n) = 0.$$

Pentru determinarea parametrilor de exploatare trebuie cunoscute curbele de variație ale sarcinii - H , puterii - P ,

randamentului - η și de cavitație - NPSH, având drept restricții turația și diametrul rotoric la ieșire.

Exprimarea curbelor caracteristice este următoarea:

- curba caracteristică energetică (sarcină),

$$(3.155) \quad H = f_1(Q);$$

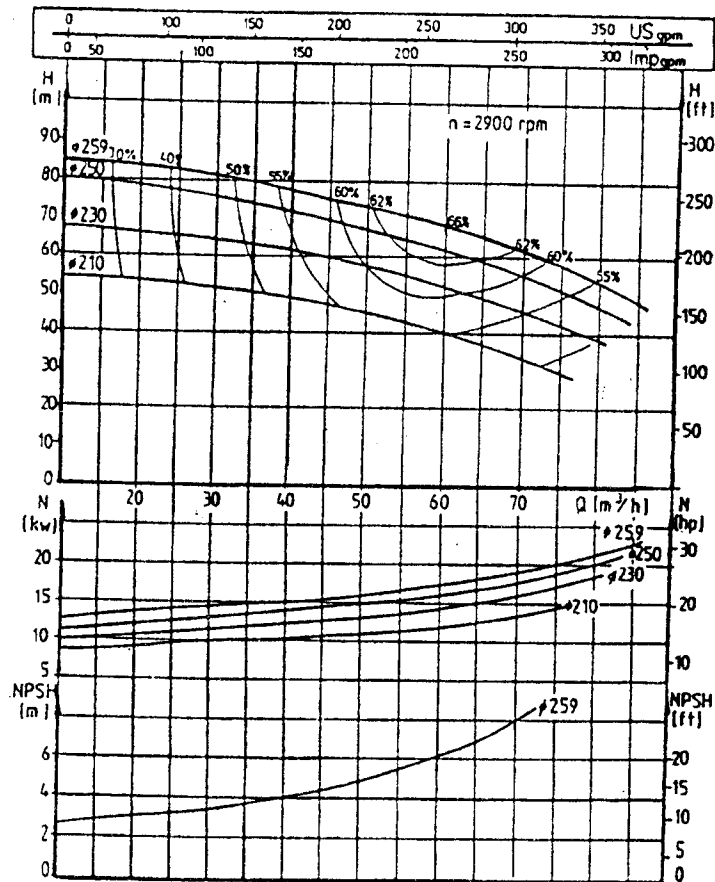


Fig. 3.48. Curbe caracteristice la pompe centrifugale monoetajate.

- curba caracteristică de putere,

$$(3.156) \quad P = f_2(Q);$$

- curba caracteristică de randament,

$$(3.157) \quad \eta = f_3(Q);$$

- curba caracteristică de NPSH,

$$(3.158) \quad \text{NPSH} = f_4(Q);$$

unde toate ecuațiile 3.155 ... 3.158 sunt determinate pentru o turație $n = \text{const}$ și același diametru al rotorului. Variația turației conduce la schimbarea parametrilor curbelor caracteristice. În figurile 3.48 și 3.49 sunt prezentate curbele caracteristice pentru pompe centrifugale folosite în stațiile de pompare pentru apă rece.

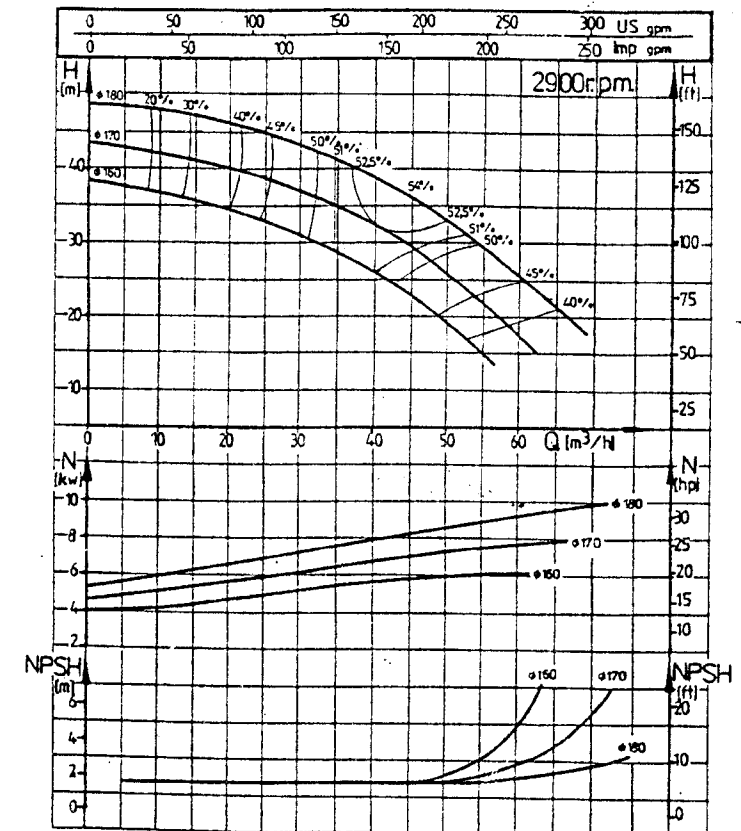


Fig. 3.49. Curbe caracteristice la pompe centrifugale multietajate.

Curbele caracteristice se determină pe un stand experimental (stand de încercare a pompelor) de către uzina constructoare, sau în laboratoare specializate, precum și în ansamblul stației de pompare.

3.6.5. Utilizarea pompelor în instalații

3.6.5.1. Criterii de alegere a pompelor

Alegerea pompelor se realizează prin analiza caracteristicilor acestora în conlucrare cu caracteristica rețelei deservite, pentru diverse situații funcționale existente în sistemul de alimentare cu apă.

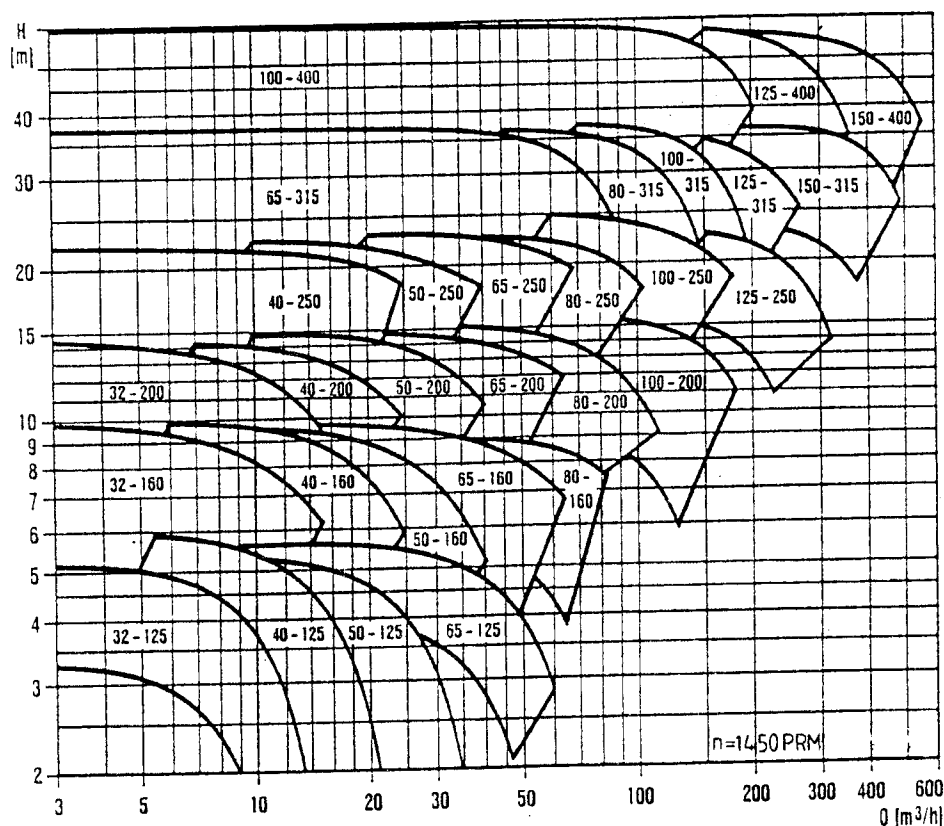


Fig. 3.50. Diagrama câmpului caracteristic la o familie de pompe.

Parametrii sistemului de alimentare cu apă, considerați la dimensionarea agregatelor de pompare, sunt următorii [16], [19]:

- graficul variației consumului de apă;
- capacitatea rezervoarelor de compensare și influența funcționării pompelor asupra acesteia;
- dimensiunile stației de pompare și a anexelor pentru diverse variante de echipare;
- numărul și mărimea agregatelor de rezervă etc.;

La alegerea pompei se va lua în considerare randamentul, alura curbelor de sarcină, turația admisă și puterea de alimentare necesară. Fiecare tip de pompă prezintă o anumită alură a curbelor caracteristice. În scopul alegerii tipului de pompă, uzinele producătoare prezintă pentru întreaga familie de pompe diagrama câmpului caracteristic (fig.3.50).

La stațiile de pompare din dotarea sistemelor de alimentare cu apă a localităților se prevede de obicei un agregat de rezervă la trei agregate în funcțiune și două agregate de rezervă, dacă numărul celor în funcțiune este mai mare de trei [15].

3.6.5.2. Caracteristica hidraulică a instalației. Parametri de funcționare ai pompei în instalație

Analiza funcționării ansamblului pompă - rețea deservită presupune, în regim normal și stabilizat de exploatare, egalitatea între debitul preluat de conducta de refulare și cel livrat de pompă. Conform schemei specifice a unei stații de pompare (fig.2.38), se definește caracteristica hidraulică a instalației prin ecuațiile (3.83 și 3.84):

$$H_C = H_{ST} + M \cdot Q^2,$$

sau

$$H_C = H_g + M \cdot Q^2,$$

unde H_{ST} și H_g sunt înălțimea statică, respectiv geodezică de pompare, conform relațiilor (3.85...3.88).

Parametrii de funcționare ai agregatului de pompare, integrat în circuitul hidraulic, se determină pentru o turație a motorului $n = \text{const.}$ și un diametru $D = \text{const.}$ prin rezolvarea

analitică, sau grafo-analitică (fig.3.33), a sistemului de ecuații (3.92):

$$\begin{cases} H_c = H_g + M_c \cdot Q^2 \\ H_p = f_1(Q) \\ \eta = f_2(Q) \\ P = f_3(Q) \\ NPSH = f_4(Q) \end{cases}$$

cu elementele dimensionale și funcționale reprezentative pentru fiecare tip de pompă.

Modificarea caracteristicii rețelei hidraulice, în timp sau accidental, determină schimbarea poziției punctului de funcționare. Din totalitatea punctelor de funcționare, numai unele sunt admise, respectiv cele care sunt situate pe ramura de funcționare a curbei de sarcină a pompei și în zona randamentelor maxime. De asemenea, se mai determină, sau verifică, înălțimea geodezică de amplasare a axului pompei (H_{ga}), parametri de cavitație, randamentele pentru diverse situații de funcționare, energia specifică unitară (e_H), consumul energetic etc (cap. 3.3.6.2).

3.6.5.3. Cuplarea pompelor în funcționare

Cerințelor variabile de debit ale consumatorilor de apă sunt deservite în stația de pompare prin funcționarea în formație a agregatelor de pompare. În stațiile de pompare pentru apă rece, pompele sunt cuplate în mod frecvent la un singur colector de refulare și doar în anumite situații au refulări individuale. Adaptarea debitului stației la cerințele consumatorului se realizează prin cuplarea în paralel a unui număr de pompe aflate în funcționare și reglarea debitului furnizat prin diverse metode.

Caracteristica funcționării în formație, în cazul cuplării în paralel (*caracteristica sumă* sau *caracteristica echivalentă*), se obține prin însumarea pe orizontală a debitelor pentru diferite valori ale presiunii specifice fiecărei pompe intrată în formația de lucru. În figura 3.51 se prezintă schema de cuplare a două pompe cu caracteristici identice pe o rețea simetrică și modul de

determinare a parametrilor funcționali pentru diverse situații de lucru. La funcționarea individuală a pompelor și la funcționarea prin cuplare în formație ($n_p=2$), punctele de funcționare se obțin la intersecția dintre caracteristica rețelei și caracteristicile pompelor pentru fiecare caz de lucru.

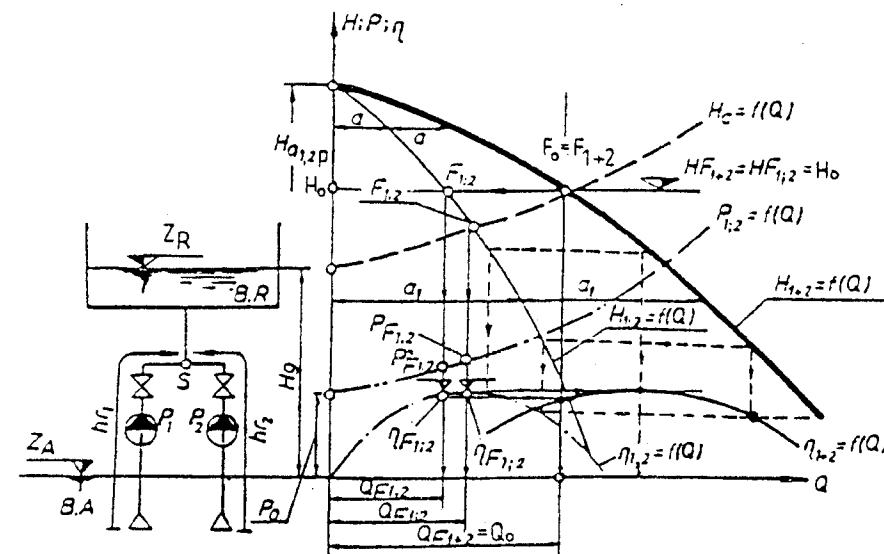


Fig. 3.51. Cuplarea pompelor în paralel. Punct de funcționare: a – cuplarea liniilor tehnologice; b – determinarea parametrilor funcționali.

Pompele pot funcționa în paralel numai dacă în punctul de branșament a conductelor de refulare individuale realizează aceeași presiune. Dacă nu este îndeplinită această condiție, pompa cu presiune mai mică va funcționa în regim de frânare. Rezultă că la anumite debite, două pompe cu caracteristici energetice diferite nu pot funcționa în paralel [5], [17].

Parametrii de funcționare în paralel a pompelor se particularizează după modul în care pompele aflate în formație de lucru debitează pe o rețea simetrică sau pe o rețea asimetrică. De asemenea, particularizarea are loc și după tipul curbelor

caracteristice ce definesc funcționarea pompelor (caracteristici identice sau diferite).

Adaptarea presiunii stației de pompare, conform cerințelor rețelei sau consumatorului, se realizează prin folosirea unor pompe multietajate și mai rar prin cuplarea în serie a unui număr de pompe. De asemenea, presiunea stației de pompare poate fi reglată prin diverse procedee [5].

3.6.5.4. Funcționarea turbopompelor în stația de pompare

În cadrul unui sistem de alimentare cu apă, la nivelul conlucrării stației de pompare cu rețeaua de distribuție deservită, toți parametri funcționali sunt variabili atât în decursul unei zile, cât și de la o zi la alta. Parametrii sistemului variază în funcție de necesitățile consumatorilor, aspect care face imposibil un control riguros, iar datele de calcul luate în considerare pot fi de tip statistic sau deterministic [15], [19].

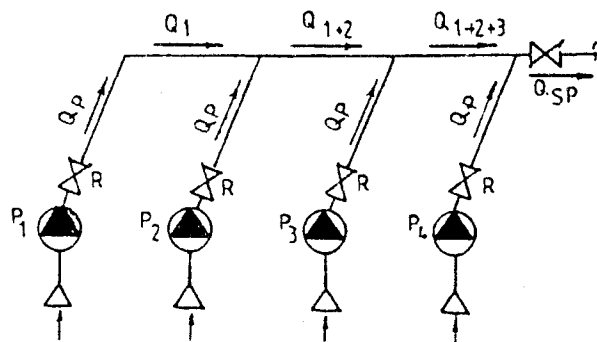


Fig. 3.52. Schema cuplării agregatelor în stația de pompare,

Parametrii funcționali ai stației de pompare se obțin prin modul de cuplare în formație a turbopompelor. Prin procesul de exploatare a agregatelor trebuie să asigure o presiune cuprinsă între două valori, $P_{\min}$ și $P_{\max}$, astfel ca debitul să corespundă punctului de funcționare cerut de sistemul deservit.

În cazul unei stații de pompare echipată cu trei pompe de turatie constantă active plus una de rezervă, cuplate în paralel (fig.3.52), care asigură gama de debite cerute de sistem de

alimentare cu apă la un ecart de presiuni de serviciu impuse, modul de funcționare este următorul (fig.3.53):

- debitul minim ($Q_{1,\min}$), corespunzător consumului minim în sistem, se obține prin funcționarea unei pompe la sarcina maximă (punctul de funcționare $F_{1,\min}$), iar parametri de exploatare ai pompei sunt reprezentați de punctul de funcționare F_1 ;

- la creșterea consumului, punctul de funcționare F_1 se deplasează în $F_{1,\max}$, unde se atinge presiunea minimă, $P_{\min}$ situație în care se mai pornește un agregat de pompare;

- două turbopompe cuplate în paralel determină parametri de pompare reprezentați de punctul de funcționare $F_2 (Q_{1+2}, H_2)$;

- punctul de funcționare F_2 , în cazul majorării consumului în sistem, se deplasează în punctul $F_{2,\max}$, unde se atinge din nou presiunea minimă, fapt ce impune pornirea celui de al treilea agregat de pompare;

- parametri de funcționare a trei turbopompe cuplate în paralel sunt reprezentați de punctul de funcționare $F_3 (Q_{1+2+3}, H_3)$, iar pentru debitul minim ($Q_{1+2+3,\min}$) de punctul $F_{3,\min}$ și debitul maxim ($Q_{1+2+3,\max}$) de punctul $F_{3,\max}$;

- în punctul de funcționare $F_{3,\max}$ se obține debitul maxim maximorom posibil a fi pompat de stația de pompare în condiții normale de funcționare;

- la micșorarea consumului în rețea, debitul scade, iar presiunea crește, fapt ce determină mutarea punctului de funcționare F_3 în $F_{3,\min}$, situație în care se închide una din pompe, iar noul punct de funcționare devine F_2 ș.a.m.d;

Din punct de vedere al consumului de energie specifică ($e - \text{kW/m}^3$), fiecare punct de funcționare trebuie să se încadreze în zona randamentului maxim al pompei (acesta constituie un criteriu de alegere a pompelor). Din punct de vedere al energiei consumate în pompare, aceasta se minimizează pentru un număr optim de agregate de pompare (ca tip, mai mici decât cele inițiale în privința debitului), care, în general, este mai mare decât cel folosit în mod curent. Un număr mai mare de agregate de pompare, dar de "tip mic", conduce la randamente individuale mai reduse și implicit la un consum de energie mai ridicat pe termen lung.

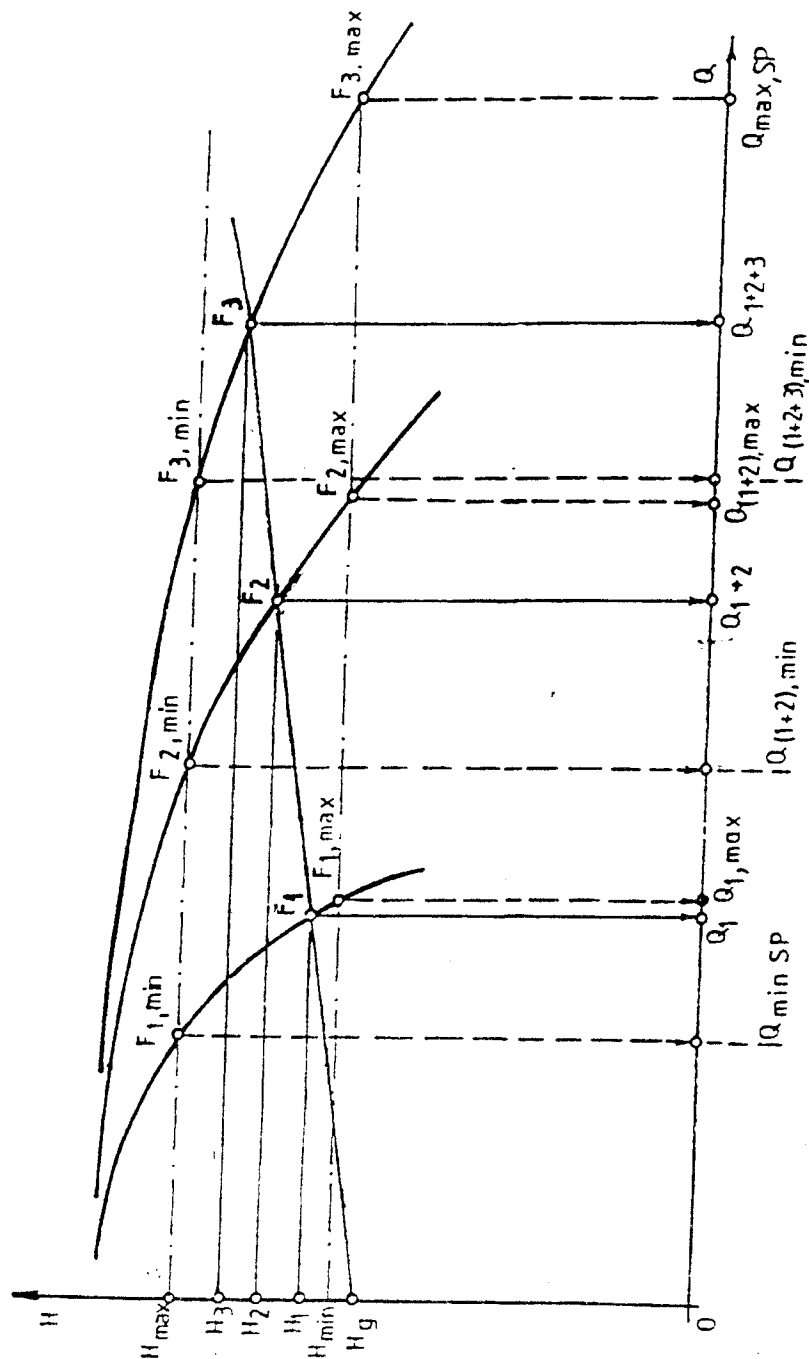


Fig. 3.53. Determinarea parametrilor de funcționare la o stație de pompare din cadrul unui sistem de alimentare cu apă.

În concluzie se poate menționa că debitul total al unui ansamblu de agregate de pompare funcționând în paralel depinde de numărul și tipul acestora, de caracteristica energetică individuală și de caracteristica rețelei (conduței de refulare). Rezultă că numărul agregatelor dintr-o stație de pompare se determină printr-un calcul de optimizare.

3.6.5.5. Reglarea debitului în instalația de pompare

În procesul de exploatare apare ca necesară adaptarea parametrilor de funcționare ai agregatelor la nevoile variabile în timp, în special de debit, ale consumatorilor. Acest lucru se realizează prin reglajul debitelor agregatelor de pompare. Metodele de reglaj cele mai folosite în stațiile de pompare sunt următoarele [5], [7], [17]:

- a - modificarea curbelor caracteristice de funcționare a pompelor, care constituie o metodă de reglaj intern;
- b - modificarea caracteristicii rețelei exterioare a instalației, care reprezintă o metodă de reglaj extern;
- c - adaptarea unor formații diferite de lucru a pompelor, prin cuplare în paralel sau în serie în procesul de funcționare.

Prin metoda de reglaj aleasă trebuie să se obțină modificarea punctului de funcționare a ansamblului *agregat de pompare - rețea*, cu asigurarea unei funcționări stabile și cu randamente acceptabile.

Reglajul intern folosește următoarele procedee:

- *reglajul debitului prin modificarea turației* de antrenare a pompei; este procedeul cel mai economic, deoarece păstrează punctul de funcționare în domeniul valorilor maxime ale randamentelor, iar soluția se aplică doar la pompele care au motoare cu turație variabilă;

- *reglajul debitului prin modificarea diametrului rotorului*, având în vedere că o pompă se construiește cu o gamă de 1 - 3 mărimi de diametre, iar punctul de funcționare va fi situat relativ în zona randamentelor economice; modificarea se poate obține prin strunjirea rotorului, dar în cadrul unor limite (25 - 5%), care trebuie să ia în considerare geometria rotorului impusă de tipul pompei;

- *reglajul debitului prin modificarea unghiului de așezare a palelor rotorice*, procedeu folosit la unele pompe axiale;

Reglajul debitului prin modificarea caracteristicii exterioare (reglaj extern) folosește, în principal, următoarele procedee:

- *reglajul debitelor prin utilizarea robinetului de pe conducta de refulare*, metodă utilizată frecvent în exploatare, deoarece este cel mai comod procedeu de reglaj, dar și cel mai neeconomic; punctul de funcționare obținut inițial se deplasează din zona randamentelor maxime, conform celor prezentate în figura 3.32, fapt ce determină creșterea consumului energetic; în cazul pompelor centrifugale, la care puterea crește odată cu debitul, este mai acceptabilă această metodă de reglaj decât altele;

- *utilizarea conductei de by - pass pentru modificarea debitului*, care este o soluție eficientă în special la pompele axiale de debit mare; pentru pompele centrifugale trebuie efectuat un studiu de analiză având în vedere aplicabilitatea procedurii la agregatele la care puterea scade odată cu debitul;

- *variația debitului pompat la modificarea sarcinii statice a rețelei*; sarcina statică a rețelei este fixă și impusă prin cerințele geodezice și de presiune ale consumatorilor; totuși, prin modificarea nivelului în bazinul de aspirație și a presiunii la consumator, se poate obține o înălțime geodezică optimă de ridicare a apei.

A treia metodă de reglaj (cuplarea pompelor în formații de lucru, în paralel sau serie) este cea mai folosită la exploatarea stațiilor de pompare și a fost tratată anterior (cap.3.6.5.4).

Alegerea metodelor de reglare se face în baza unui studiu complex, care cuprinde o serie de parametri tehnico economici, de amplasament a stației, mod de livrare în timp al debitului, ecartul de presiuni etc.

3.6.5.6. Reglarea debitului prin modificarea turației pompei

Reglarea turației motorului de antrenare a pompei se realizează prin folosirea unor convertoare de frecvență. În cazul unor motoare de antrenare alimentate la tensiuni medii de 6 kV sau 10 kV, convertoarele de frecvență impun și utilizarea unor transformatoare suplimentare. Din motive tehnice și economice se

fabrică convertoare de 380 V asociate cu transformatoare coborâtoare și ridicătoare de tensiune [15].

Prin folosirea controlului asupra turației motorului de antrenare a pompei se păstrează valoarea debitului în zona randamentelor maxime, la aceeași înălțime de pompare (fig. 3.54). Acest aspect are o importanță deosebită asupra puterii agregatului, care rămâne la valori optime și influențează pozitiv consumul de energie totală și specific al stației de pompare.

Folosirea procedurii de modificare a turației motorului de antrenare trebuie să ia în considerație pierderile de putere, care au loc în motorul de antrenare și în convertorul static de frecvență. În anumite situații pierderile pot fi echivalente cu cele care apar la folosirea reglajului debitului prin intermediul robinetului de pe conducta de refulare.

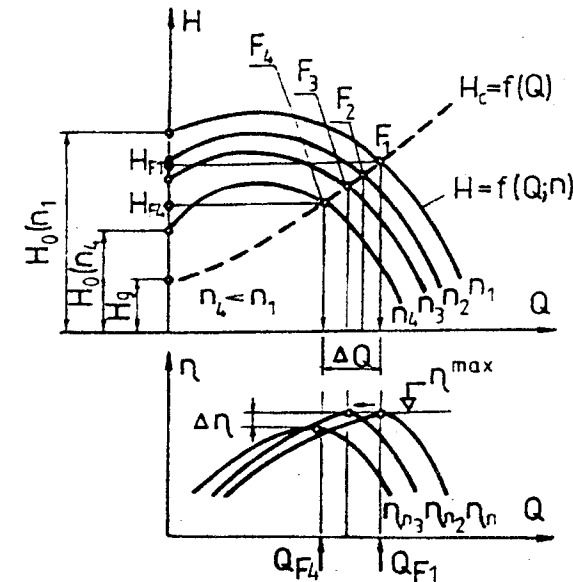


Fig. 3.54. Reglarea debitului prin modificarea turației de antrenare a motoarelor.

Rezultă că trebuie alese convertoare statice de frecvență care să prezinte randamente foarte mari, pentru a se putea neglija pierderile de putere proprii. În acest caz analiza comparativă a consumului de energie, între o pompă cu turație constantă și una cu turație variabilă datorită prezenței convertorului de frecvență, se

poate face pe baza diferențelor de putere de alimentare la acționarea motoarelor.

3.6.6. Exploatarea pompelor fără regim de cavitație

Cavitația apare la pompe în zonele de mișcare a apei unde presiunea scade sub valoarea sa critică (p_{cr}). Aceste zone sunt localizate la intrarea în palele rotorice în cazul pompelor centrifugale și cât mai aproape de butuc la pompele axiale. De asemenea, zonele de presiune mică sunt determinate de valoarea ridicată a vitezei, înregistrată în secțiunile de curgere cu arii micșorate, sau în prezența muchiilor ascuțite [5], [11].

Evitarea fenomenului de cavitație se realizează prin limitarea înălțimii de aspirație a pompelor. În relația de calcul a înălțimii de aspirație intră rezerva de cavitație a pompei, dată de producătorul de utilaj și care depinde de tipul pompei. Înălțimea geodezică de aspirație (H_{ga}) se calculează pentru $NPSH_p$ cel mai defavorabil și la valoarea maximă a pierderilor de sarcină.

În exploatarea instalațiilor de pompare apar situații frecvente în care pompele funcționează sub parametri nominali și în regim de cavitație. Acest fapt determină diminuarea parametrilor de pompare, uzura exagerată a rotoarelor, precum și a altor componente de pe linia tehnologică de bază. Studiile efectuate indică următoarele cauze principalele [5], [7]:

- funcționarea pompelor cu debit mărit, respectiv la o sarcină mică, fie datorită înălțimilor geodezice reduse, dar și datorită funcționării pe o conductă de refulare de mare diametru a unei singure pompe din cele aflate în dotare;

- înfundarea grătarelor la piesele de aspirație ;
- colmatarea bazinului în zona pieselor de aspirație ;
- funcționarea cu robinetul pe aspirație parțial deschis ;
- înfundarea grătarelor la avancamă ;
- majorarea gradului de rugozitate al rotorului etc.

Cauzele de acest pot fi remediate prin soluții de reabilitare tehnologică, sau de modernizare și sunt condiționate de modul de organizare și control a activității în stația de pompare.

BIBLIOGRAFIE

1. Altșul A., D. - *Ghidrauliceskie soprotivlenia*. Izd. Nedra, Moskva, 1982.
2. Bartha I., Javgureanu V. - *Hidraulica*, Ed. Tehnica, Chișinău, 1998.
3. Bartha I., Luca M., Popia A., Popescu Șt. - *Hidraulică. Culegere de probleme*. Ed. Universității Tehnice "Gh. Asachi" Iași, 1991.
4. Bârsan E., Vâscu V. și Gavrilăș G. - *Alimentări cu apă. Îndrumar de proiectare*. Ed. Universității Tehnice "Gh. Asachi" Iași, 1993.
5. Burchiu V., Santău I., Alexandrescu O. - *Instalații de pompare*. Editura Didactică și Pedagogică, București, 1982.
6. Cioc D. - *Hidraulica*, Editura Didactică și pedagogică, București, 1981.
7. Ganea N. - *Alegerea, exploatarea, întreținerea și repararea pompelor*. Editura Tehnică, București, 1981.
8. Iamandi C. și colectiv. - *Hidraulica instalațiilor. Elemente de calcul și aplicații*. Editura Tehnică, București, 1985.
9. Idelcik I. E. - *Îndrumător pentru calculul rezistențelor hidraulice*. Editura Tehnică, București, 1984.
10. Leca A., Prisecaru I., Tănase H. M., Lupescu L., Raica C. - *Conducte pentru agenți termici. Îndreptar*. Ed. Tehnică, București, 1986.
11. Luca M. - *Hidraulică tehnică*. Vol. I. Ed. Tehnopress, Iași, 1998.
12. Luca, M. - *The local head losses to the joining made from plastics*. Buletinul Univ. Tehn. Iași, tom XLII (XLVI), fasc. 1-4, secția VII, 1996.
13. Luca M. - *Determination of head losses for small diameter polyethylene tubes*. Buletinul Univ. Tehn. Iași, tom XLI (XLV), fasc. 1-4, secția VII, 1995.
14. Mateescu D., Ivan M. - *Conducte metalice circulare cu diametru mare*. Editura Tehnică, București, 1985.

15. Mănescu Al., Sandu M., Ianculescu O. - *Alimentări cu apă*. Editura Didactică și Pedagogică, București, 1994.
16. Mănescu Al. - *Alimentări cu apă. Aplicații*, Editura HGA, București, 1998.
17. Pavel D. - *Stații de pompare și rețele de transport hidraulic*. Editura Didactică și Pedagogică, București, 1967.
18. Pavel D. - *Mașini hidraulice. Secțiunea XI. Manualul inginerului hidrotehnician*. Editura Tehnică, București, 1969.
19. Pâslărașu I., Teodorescu M., Rotaru C. - *Alimentări cu apă*. Editura Tehnică, București, 1981.
20. Petrescu V. și Damian R. - *Hidraulica instalațiilor*, vol. I, Editura Didactică și pedagogică, București, 1994.
21. Popescu, M., Arsenie D. - *Metode de calcul hidraulic pentru uzine electrice și stații de pompare*, Ed. Tehnică, București, 1987.
22. Trofin P. - *Alimentări cu apă*. Editura Didactică și Pedagogică, București, 1983.
23. Vintilă Șt., Cruceru T., Onciu L. - *Instalații sanitare și de gaze*. Editura Didactică și Pedagogică, București, 1995.
24. 21 x x x - *Manualul inginerului hidrotehnician*, vol. I, Editura Tehnică, București, 1969.
25. x x x - ICCPDC și IPCT - *Rezervor circular din beton armat pentru înmagazinarea apei cu capacitatea de ... m³*. Proiect 5376/n.
26. x x x - ICCPDC și IPCT - *Soluții și instalații hidrotehnice pentru rezervoare și castele de apă*. Proiect 5508/1980.
27. STAS10110/85 *Alimentări cu apă. Stații de pompare. Prescripții generale de proiectare*.
28. STAS 10898/85 *Alimentări cu apă și canalizări. Terminologie*.
29. STAS 7215 - 80 *Pompe centrifuge și instalații de pompare, terminologie, simboluri și unități de măsură*.

ANEXA 3.

TABELE ȘI GRAFICE PENTRU CALCUL HIDRAULIC

ANEXA. 3.1. Valorile rugozității absolute echivalente $k_e = 2\Delta_e$ pentru conducte.

ANEXA. 3.2. Coeficienții de rugozitate n din formulele Manning, Pavlovski și Ganguillet – Kutter pentru conducte și galerii.

ANEXA. 3.3 Coeficientul lui Darcy $\lambda = f(Re, k/D)$. Diagrama lui Moody.

ANEXA. 3.4 Grafic $J = f(Q, D)$ la tuburile din metal și PREMO după formula lui Manning ($1/n = 83$).

ANEXA. 3.5 Grafic $J = f(Q, D)$ la tuburile din beton prefabricat după formula lui Manning ($1/n = 74$).

ANEXA. 3.6 Grafic $J = f(Q, D)$ la tuburile din azbociment după formula lui Manning ($1/n = 90$).

ANEXA. 3.7 Grafic $J = f(Q, D)$ la tuburile din PVC după formula Colebrook – White ($n = 0,01$).

ANEXA. 3.8 Diagrama $\lambda = f(Q, D)$ pentru conducte noi din oțel (Șevelev).

ANEXA. 3.9 Diagrama $\lambda = f(Q, D)$ pentru conducte noi din fontă (Șevelev).

ANEXA. 3.10 Diagrama $\lambda = f(Q, D)$ pentru conducte vechi din fontă și oțel (Șevelev).

ANEXA. 3.11. Valorile modulului de debit K pentru conducte.

ANEXA. 3.12. Coeficienții de rezistență locală $\zeta_c = f(\delta, R, l/d, n)$ la coturile de conductă executate din segmente

ANEXA. 3.13 Coeficientul de rezistență locală ζ_i la intrarea dreaptă și teșită în conductă.

ANEXA. 3.14 Coeficientul de rezistență locală $\zeta_v = f(a/D)$ la un robinet tip sertar.

ANEXA. 3.15 Coeficientul de rezistență locală $\zeta_f(\theta)$ la un robinet tip fluture.

Anexa 3.1.

Valorile rugozității absolute echivalente pentru conducte [9], [14]

Grupa	Material, starea suprafeței și mod de exploatare	$k_e=2\Delta_e$, mm
I	Tuburi trase	
	1. Noi, din alamă, bronz, plumb, sticlă	0,001-0,002
	2. Întrebuințate, din alamă, bronz, plumb	0,01 – 0,03
	3. Furtune netede din cauciuc	0,0016
II	Tuburi din oțel trase (lamine)	
	1. Noi, neintrate în exploatare	0,02 – 0,10
	2. Curate, după mulți ani de exploatare	până la 0,04
	3. Bitumate	până la 0,04
	4. Conducte de apă, în exploatare	1,20 – 1,50
	5. Idem, cu depuneri de piatră	3,00
	6. Idem, cu suprafața interioară în stare proastă	≥ 5,0
	7. Idem, după curățare	0,50
III	Tuburi din oțel sudate	
	1. Noi și vechi în stare bună, cu îmbinări sudate	0,04 – 0,10
	2. Proaspăt bitumate	≈ 0,05
	3. Noi, cu strat de beton sclivisit	0,18
	4. Aflate în exploatare, cu bitumul parțial spălat	≈ 0,10
	5. Aflate în exploatare, cu coroziune uniformă	≈ 0,15
	6. Mediu corodate, cu cruste mici	0,20 – 0,70
	7. Cu coroziune veche, cu cruste medii	0,80 – 1,50
	8. Puternic corodate, cu cruste mari	2,0 - 4,0
	9. Cu sudură transversală dublă, necorodate, murdărite în exploatarea cu apă	1,20 – 1,50
	10. Cu sudură transversală dublă, puternic corodate	2,00
	11. Cu suprafețe în stare proastă, cu păsuire neuniformă a îmbinărilor	≥ 5,0
	12. După curățare	0,50

IV	Conducte din oțel zincate	
	1. Zincare nouă, îngrijită	0,07 – 0,10
	2. Zincare obișnuită	0,10 – 0,15
V	Conducte din fontă	
	1. În stare nouă	0,25 – 1,00
	2. În stare nouă, bitumate	0,10 – 0,15
	3. Conducte de apă, aflate în exploatare	0,50 – 1,50
	4. În exploatare, corodate	1,0 - 1,50
	5. Foarte vechi, cu cruste	1,50 – 3,0
	6. Cu depuneri importante	2,0 – 4,0
	7. Folosite în instalații de canalizare	1,20
	8. Curățate, după folosire îndelungată	0,30 – 0,50
VI	Tuburi din beton	
	1. Cu suprafața sclivisită, în stare bună	0,30 – 0,80
	2. Noi, cu rugozitate medie (nesclivisite)	1,0 – 3,0
	3. Suprafață brută, rugoasă	3,0 – 9,0
	4. Folosite, sclivisite, pentru apă	0,20 – 0,80
	5. Tuburi din beton armat	2,50
	6. Tuburi din azbociment, noi	0,05 – 0,10
	7. Tuburi din azbociment, stare medie	0,60
VII	Tuburi din mase plastice	
	1. Tuburi din PVC noi	0,0014
	2. Tuburi din PVC vechi (în exploatare)	0,005-0,007
	3. Tuburi din Polietilenă de joasă densitate	0,001-0,005
	4. Tuburi din Polietilenă de înaltă densitate	0,007

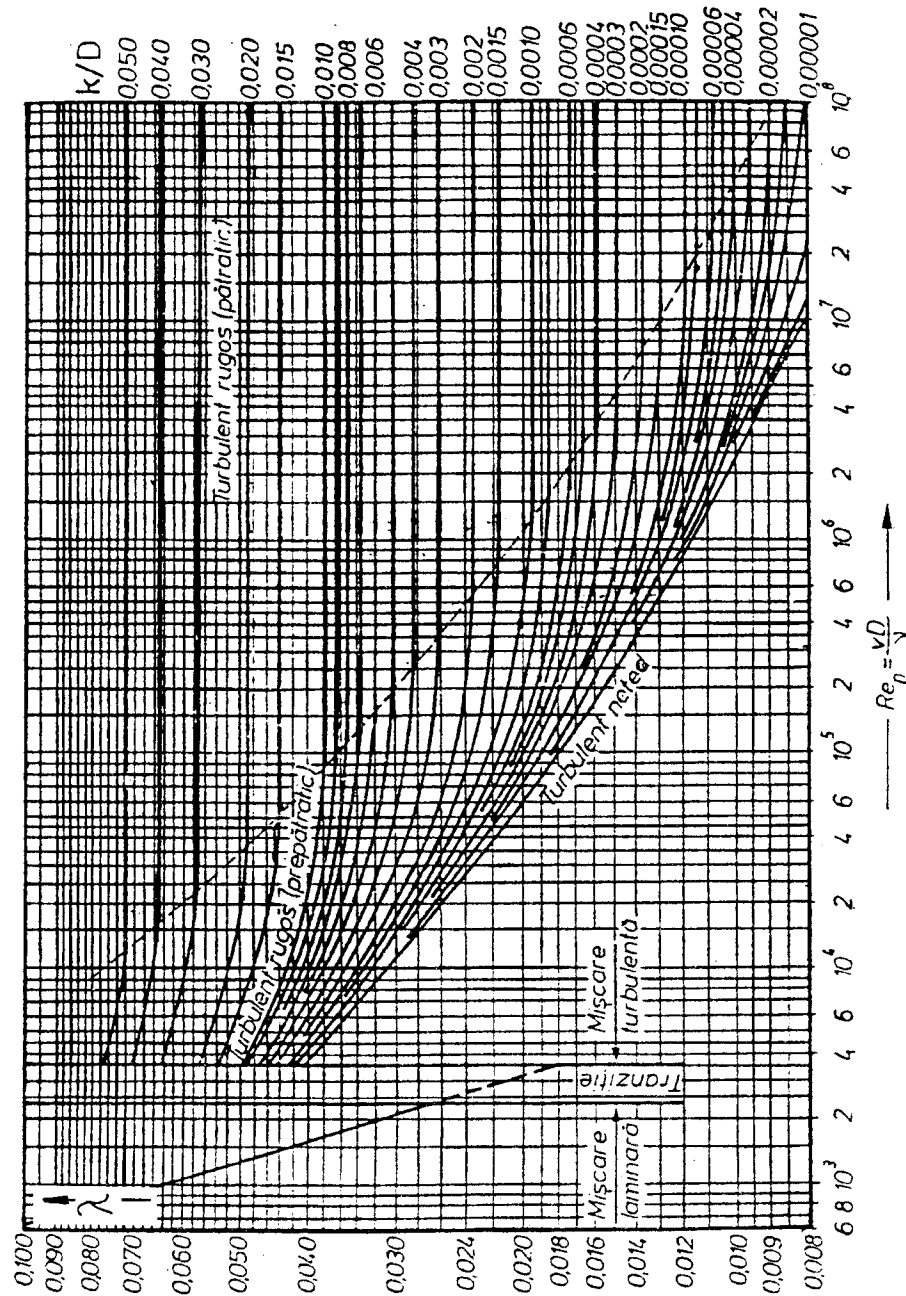
Anexa 3.2.

Coeficienții de rugozitate n din formulele Manning, Pavlovski și Ganguillet – Kutter pentru conducte și galerii [9], [11].

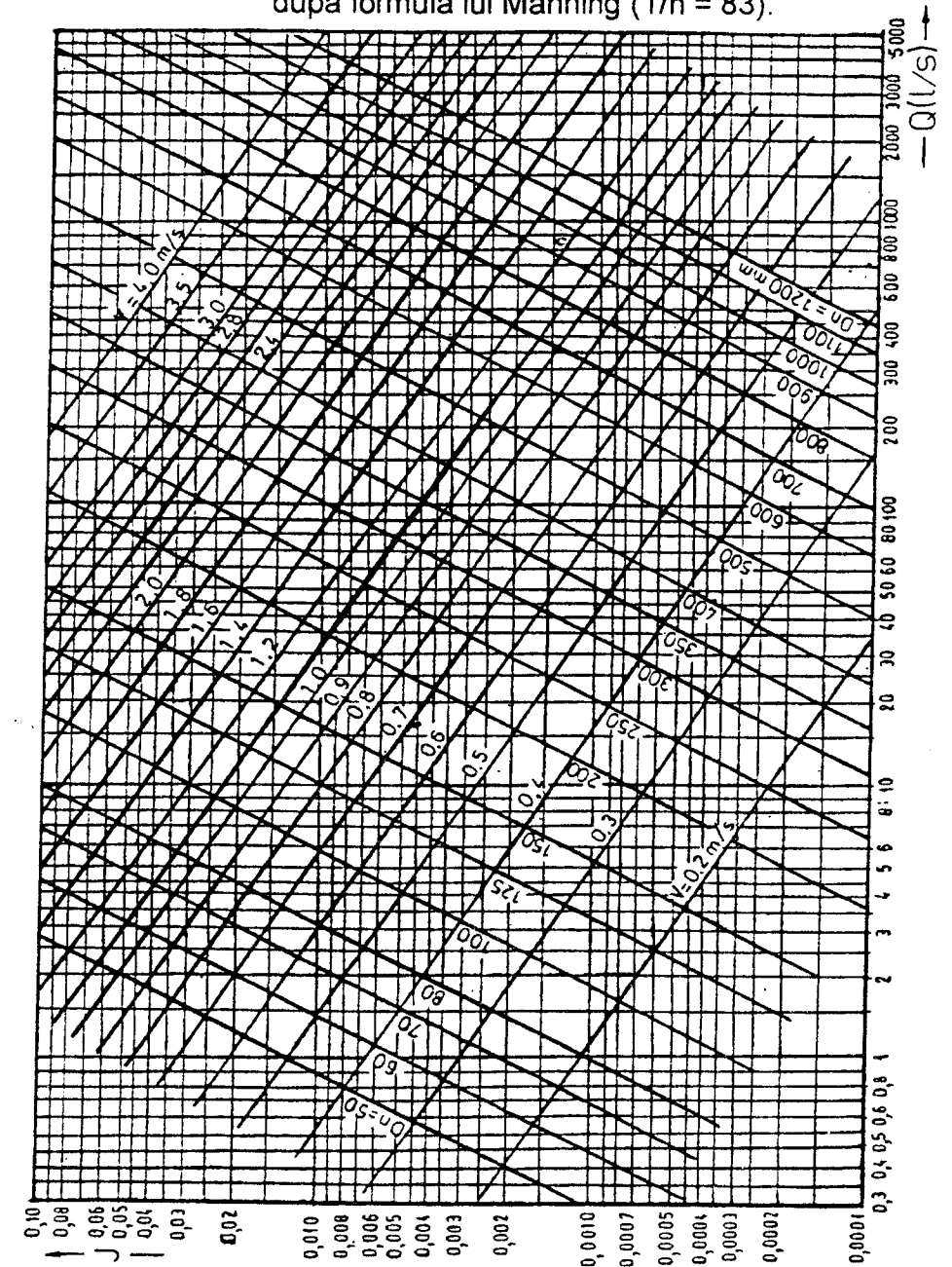
Nr ot	Natura pereților conductei sau canalului	Ecart de variație	Date de calcul	
			n $\pm 5\%$	$1/n$ $\pm 5\%$
1	2	3	4	5
1.	Sticlă, bronz, suprafețe lăcuite, sau emailate. Azbociment, ciment centrifugat			
	- noi, foarte netede	0,007 – 0,009	0,008	125
	- în serviciu	0,009 – 0,013	0,011	90
2.	Fier, fontă, oțel			
	Fontă curată nouă	0,010 – 0,015	0,012	83,3
	Fontă încrustată sau tuberculizată	0,015 – 0,035		
	Tablă de oțel, sudată în stare bună, bitumată îngrijit	0,0075 – 0,012	0,011	90,8
	Tablă bună, bitumată, în serviciu		0,012	83,3
	Idem, sudată în lung și nituită transversal	0,012 – 0,017	0,014	71,5
	Idem, ondulată transversal		0,022	15,5
3.	Beton de ciment			
	a) Beton netencuit:			
	Cofraje metalice		0,013	76,8
	Cofraje de scânduri geluite, bine			

	Încheiate, bine compactat		0,014	71,5
	Cofraje, scânduri negeluite cu rosturi brute, execuție bună		0,015	66,7
	Cofraje brute, rosturi neglijent executate		0,016	62,5
	b) Beton tencuit			
	Ciment sclivisit, executat foarte îngrijit		0,011	90,8
	Idem, executat îngrijit, rosturi de dilatație tencuite, curbe puține, cu raze mari		0,012	83,3
	d) Beton torcretat			
	Suprafața frecată cu perii de oțel		0,018	55,7
	Suprafața lăsată neprelucrată		0,019	52,7
	e) Beton vechi, alterat		0,020	50,0
	f) Beton executat îngrijit, pe care s-a prins pielea de canal		0,013	76,8
4.	Cărămidă, piatră, ceramică			
	Piatră de talie bine executată și rostuită			
	Cărămidă, bine executată și rostuită		0,013	76,8
	Piatră brută rostuită, după calitatea lucrării	0,017 – 0,020	0,018	55,7
	Olane de argilă arsă	0,011 – 1,017	0,013	76,8
	Conducte de canalizare, vitrificate	0,010 – 0,017	0,014	71,5

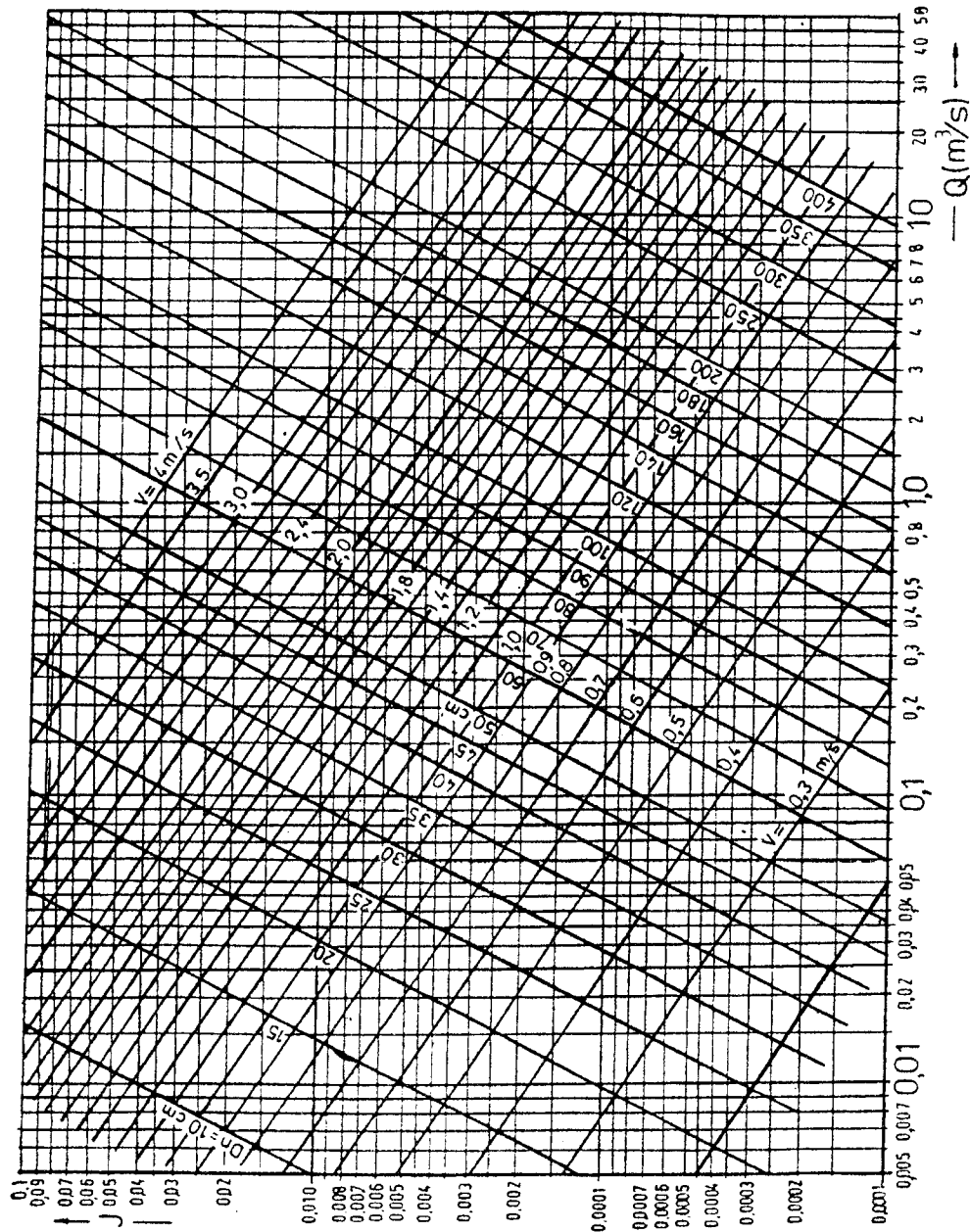
Anexa 3.3 Coeficientul lui Darcy $\lambda = f(Re, k/D)$, diagrama Moody.



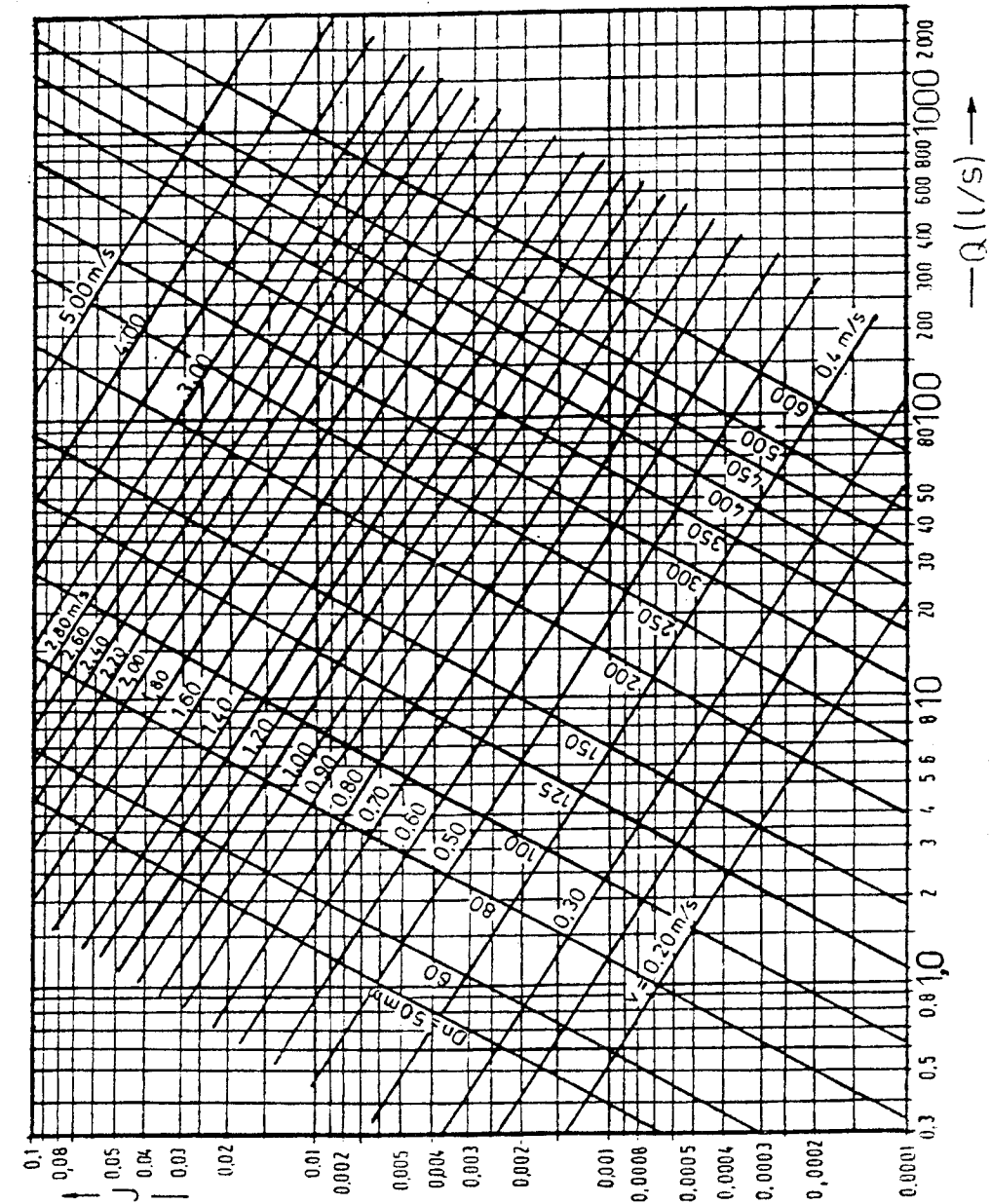
Anexa 3.4. Grafic $J = f(Q, D)$ la tuburile din metal și PREMO după formula lui Manning ($1/n = 83$).



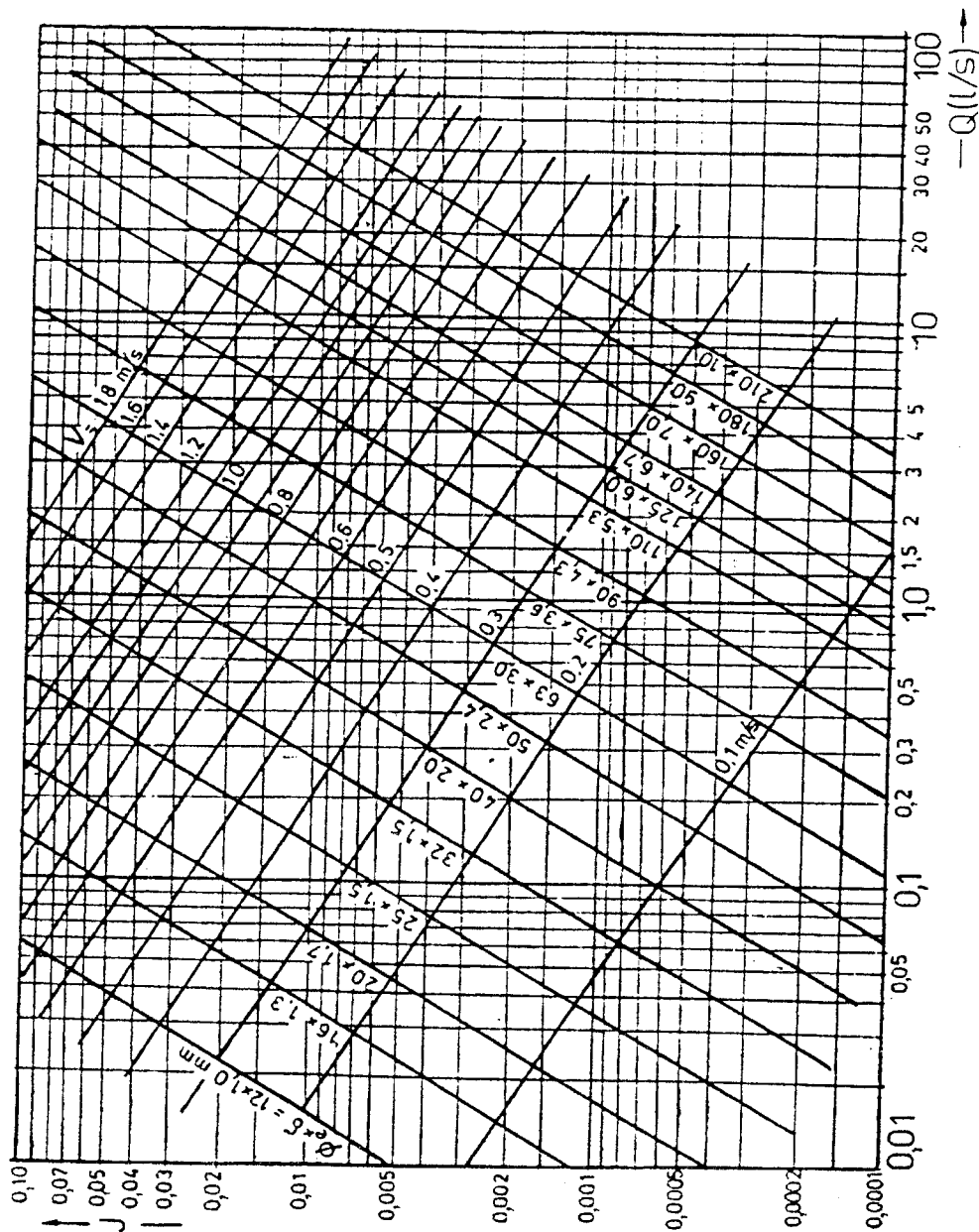
Anexa 3.5. Grafic $J = f(Q, D)$ la tuburile din beton prefabricat după formula lui Manning ($1/n = 74$).



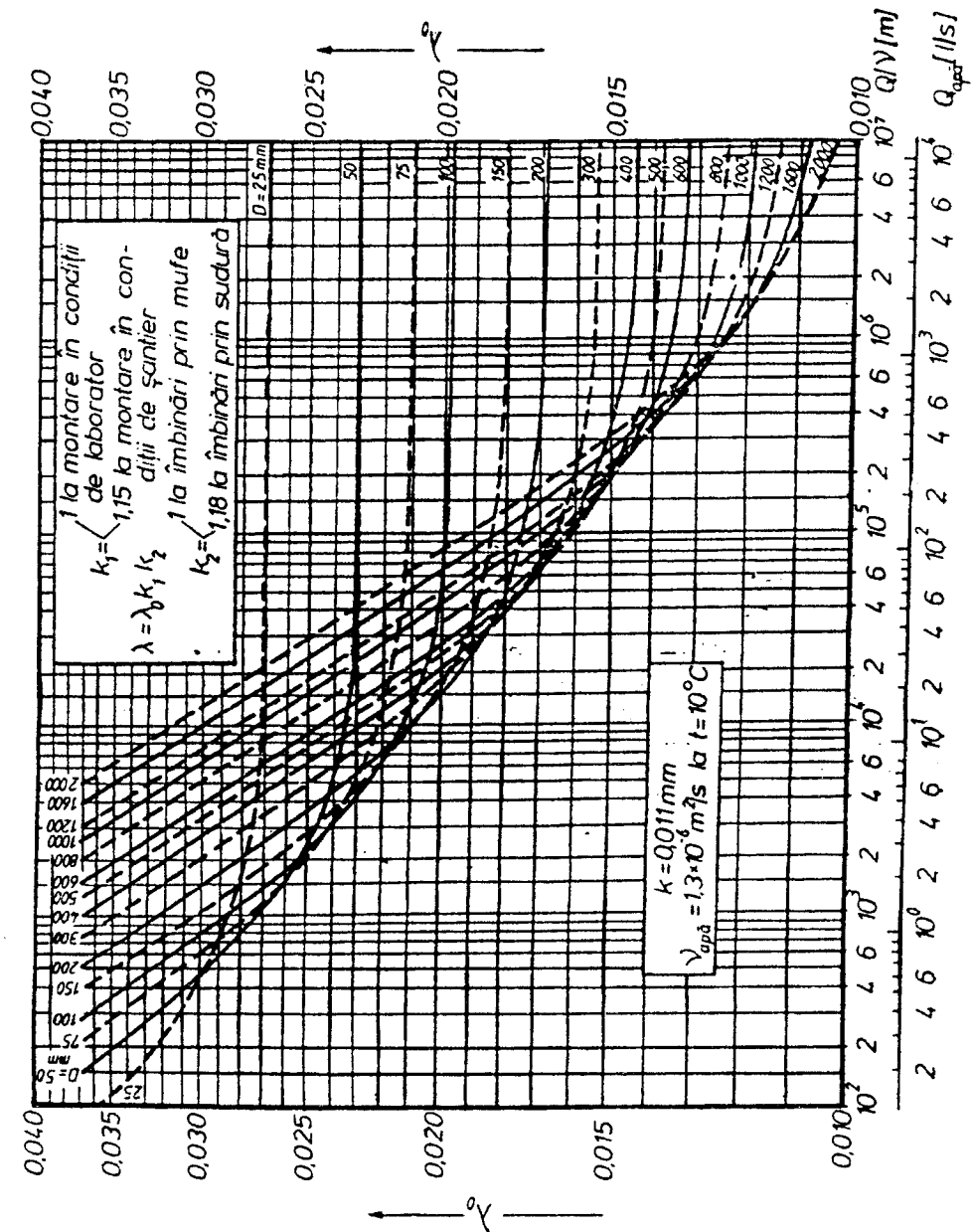
Anexa 3.6. Grafic $J = f(Q, D)$ la tuburile din azbociment după formula lui Manning ($1/n = 90$).



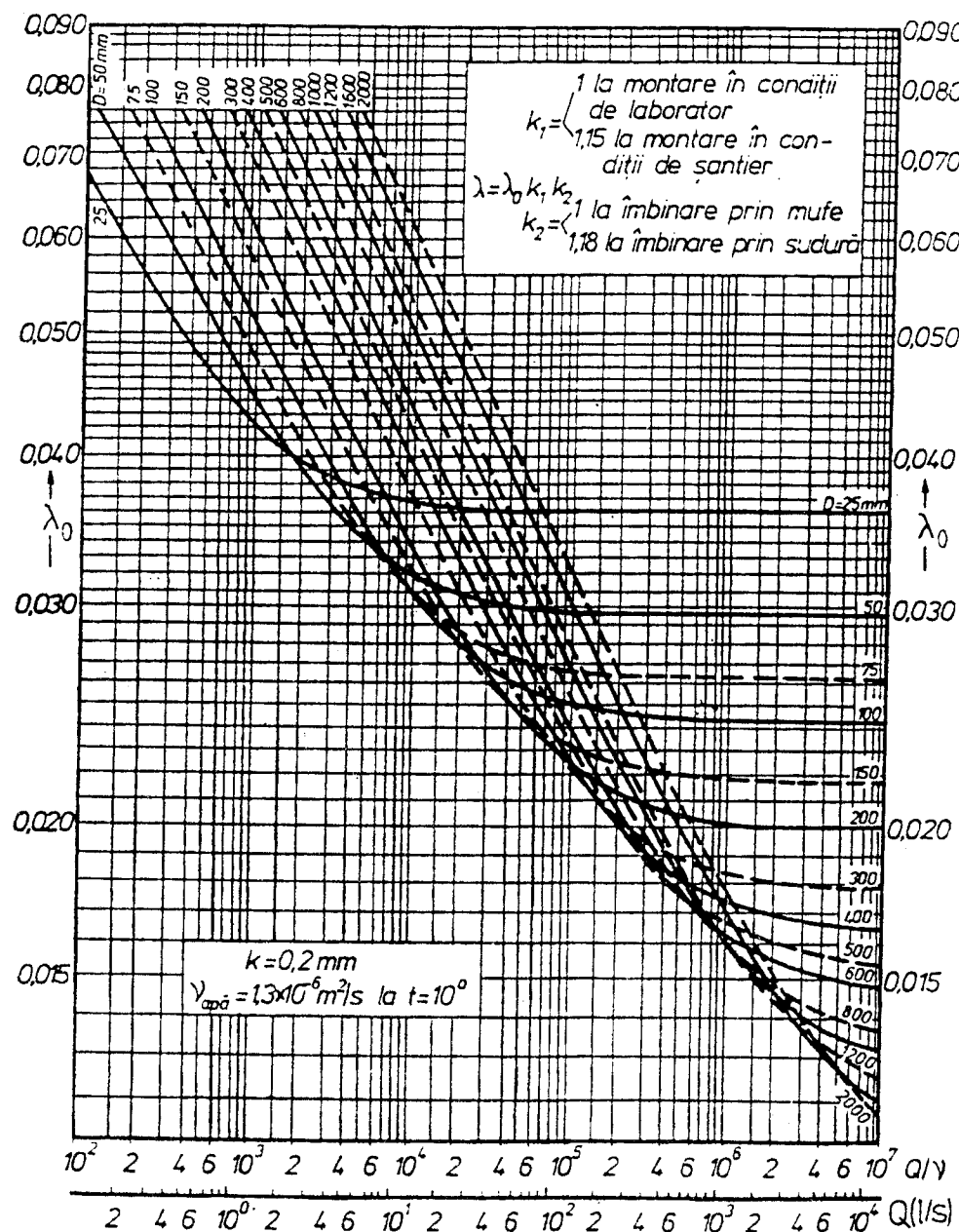
Anexa 3.7. Grafic $J = f(Q, D)$ la tuburile din PVC după formula Colebrook – White ($n = 0,01$).



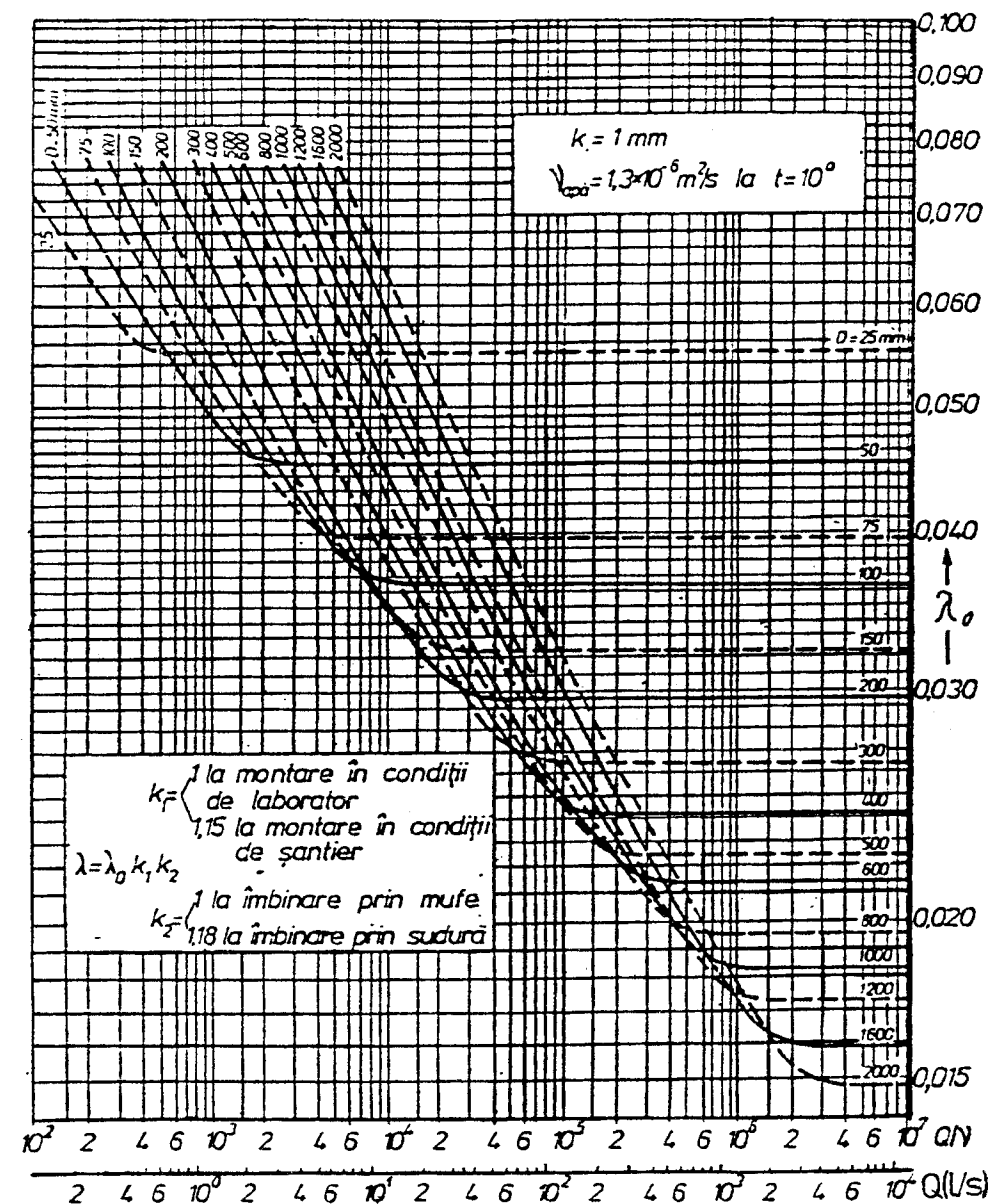
Anexa 3.8. Diagrama $\lambda = f(Q, D)$ pentru conducte noi din oțel (Șevelev).



Anexa 3.9. Diagrama $\lambda = f(Q, D)$ pentru conducte noi din fontă (Șevelev).



Anexa 3.10.
Diagrama $\lambda = f(Q, D)$ pentru conducte vechi din fontă și oțel (Șevelev).

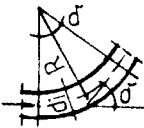
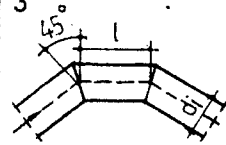
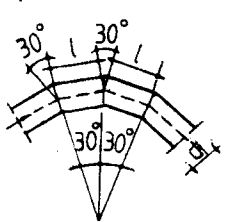
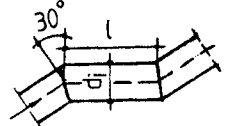


Anexa 3.11.

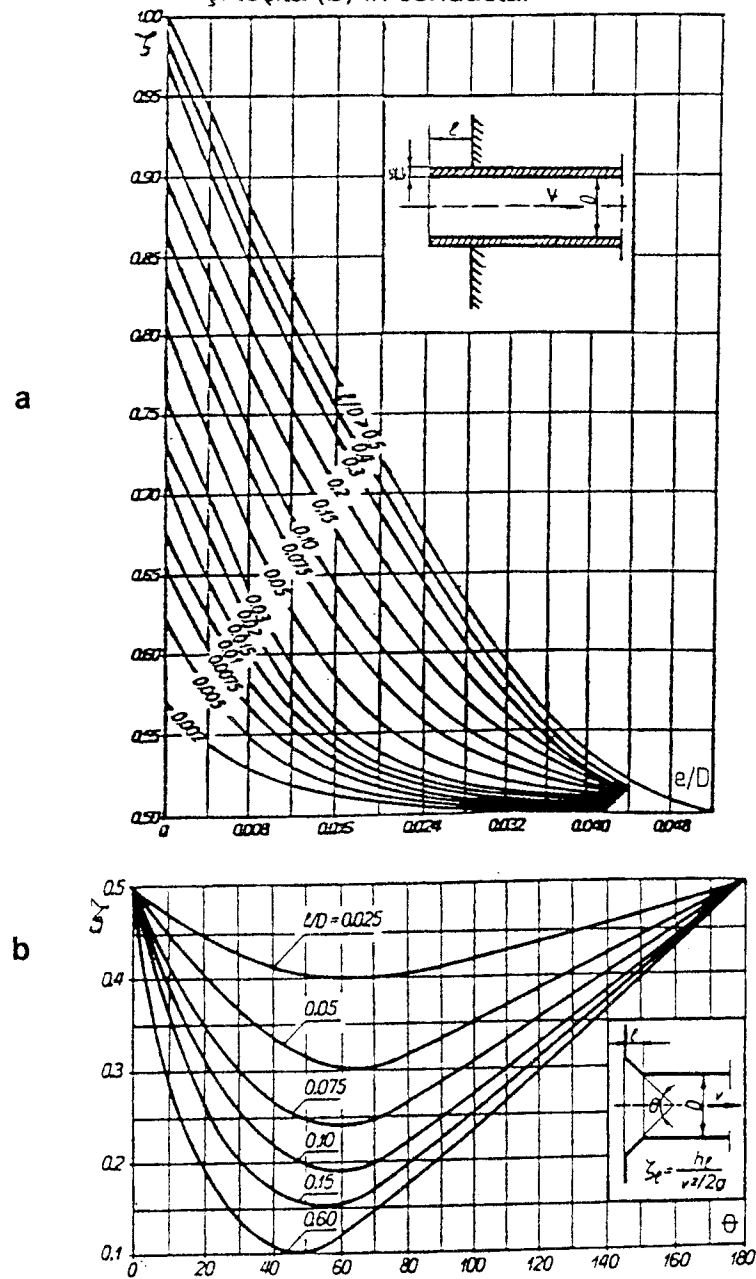
Valorile modului de debit K pentru conducte

D (m)	A (m ²)	K = f (D, k), în m ³ /s		
		noi din oțel	noi din fontă	Vechi
		k = 0,001mm	k = 0,2 mm	k = 1 mm
0,025	0,00049	0,0018	0,0017	0,0013
0,050	0,00196	0,0110	0,0103	0,0085
0,075	0,00442	0,0318	0,0308	0,0260
0,100	0,00785	0,0670	0,0663	0,058
0,125	0,02287	0,1202	0,119	0,099
0,150	0,01767	0,194	0,192	0,162
0,175	0,02405	0,291	0,291	0,232
0,200	0,03142	0,409	0,411	0,338
0,225	0,03978	0,56	0,562	0,463
0,250	0,04909	0,738	0,744	0,610
0,300	0,07068	1,16	1,204	0,989
0,350	0,09521	1,77	1,80	1,480
0,400	0,12566	2,52	2,58	2,115
0,450	0,12904	3,45	3,53	2,887
0,500	0,19635	4,51	4,62	3,634
0,600	0,29274	7,26	7,47	6,189
0,700	0,34465	10,84	11,96	9,34
0,800	0,50266	15,37	15,87	13,29
0,900	0,63617	20,88	22,10	18,15
1,000	0,7854	27,70	28,50	24,00
1,200	1,1309	44,10	48,50	38,90
1,400	1,5394	65,80	68,10	58,51
1,600	2,0106	92,8	96,36	83,40
1,800	2,5447	127,0	125,5	115,9
2,000	3,1416	166,0	169,5	158,6

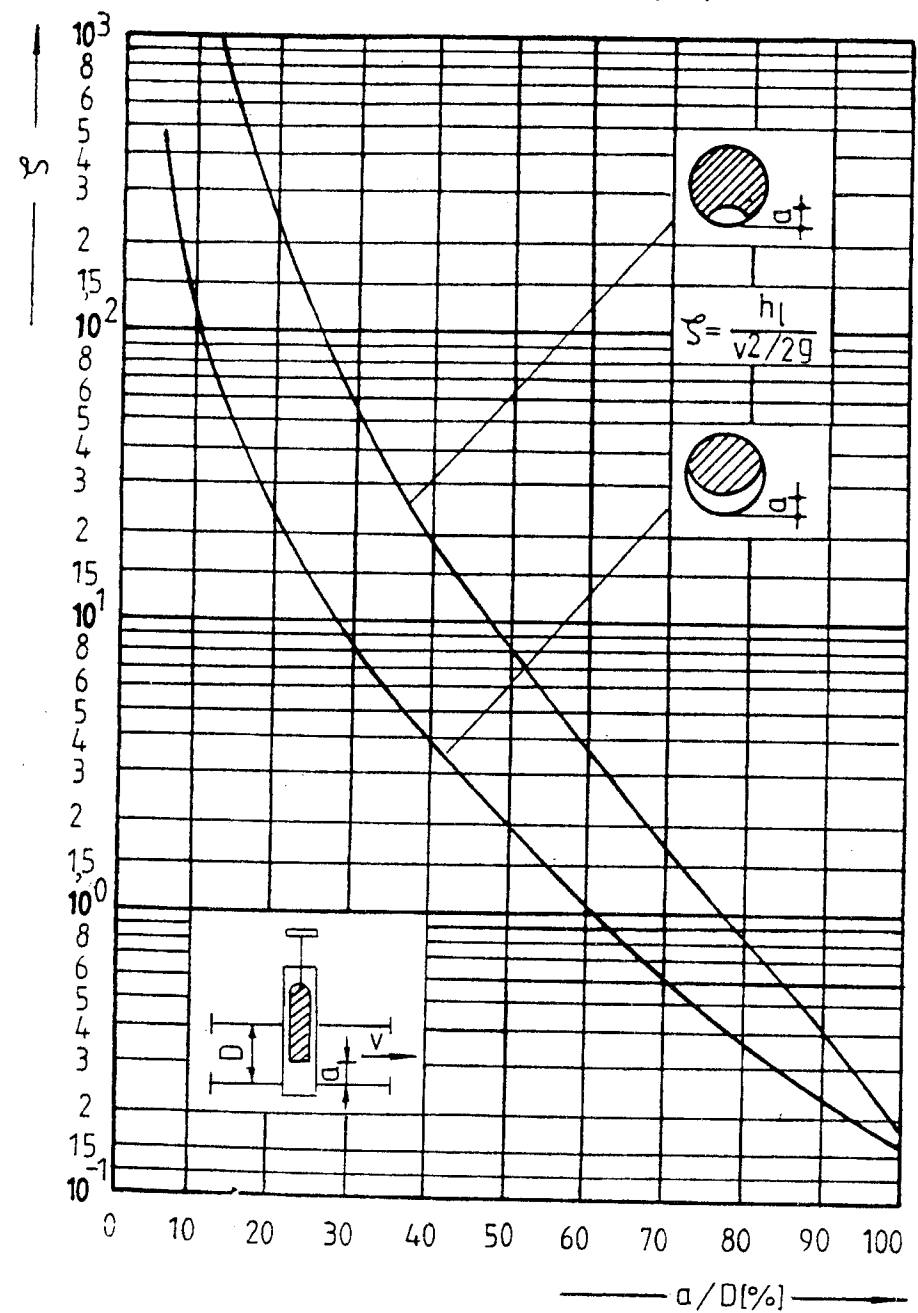
Anexa 3.12. Coeficienții de rezistență locală $\zeta_c = f(\delta, R, l/d, n)$ la coturile de conductă executate din segmente

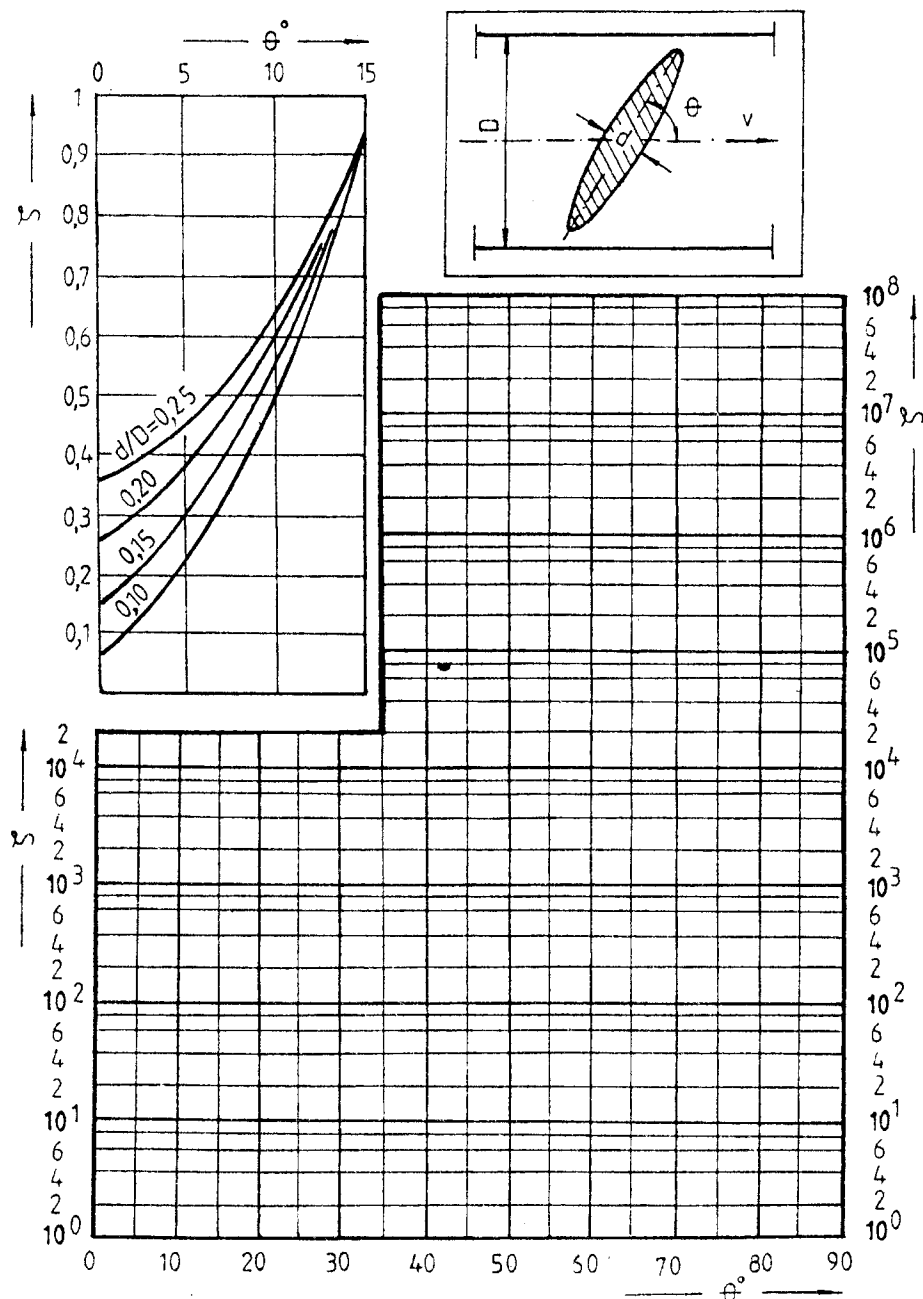
Cot curb								
1		R	Neted					Rugos
		δ	15°	22,5°	45°	60°	90°	90°
		$>d$	0,03	0,045	0,14	0,19	0,21	0,51
		$=2d$	0,03	0,045	0,09	0,12	0,14	0,30
		$=4d$	0,03	0,045	0,08	0,10	0,11	0,23
		$=6d$	0,03	0,045	0,075	0,09	0,09	0,18
		$=10d$	0,03	0,045	0,07	0,07	0,11	0,20
Cot din segmente								
2		δ	15°	22,5°	30°	45°	60°	90°
		Nr. suduri Inelare	1	1	1	1	1	1
		$\zeta_{c,n}$ Neted	0,06	0,07	0,11	0,24	0,47	1,13
		$\zeta_{c,r}$ Rugos	0,08	0,11	0,17	0,32	0,68	1,27
		Nr. suduri	-	2	2	2	3	3
		ζ	-	0,06	0,10	0,15	0,20	0,25
3		L/d	0,71	0,943	1,174	1,42	1,86	2,56
		$\zeta_{c,n}$ Neted	0,51	0,35	0,33	0,28	0,29	0,36
		$\zeta_{c,r}$ Rugos	0,51	0,41	0,38	0,38	0,39	0,43
4		L/d	1,70	6,00				
		$\zeta_{c,n}$ Neted	0,15	0,20				
		$\zeta_{c,r}$ Rugos	0,30	0,40				
5		L/d	1,23	1,67	2,37	3,77		
		$\zeta_{c,n}$ Neted	0,16	0,16	0,14	0,16		
		$\zeta_{c,r}$ Rugos	0,30	0,28	0,26	0,24		

Anexa 3.13. Coeficientul de rezistență ζ_i la intrarea dreaptă (a) și teșită (b) în conductă.



Anexa 3.14. Coeficientul de rezistență locală $\zeta_v = f(a/D)$ la un robinet serrar.



Anexa 3.15. Coeficientul de rezistență locală $\zeta_f(\theta)$ la un robinet fluture.

Capitolul 4

SISTEME CONSTRUCTIVE PENTRU
REZERVOARE ȘI CONSTRUCȚII
ASIMILABILE ACESTORA

4.1 CONSIDERAȚII GENERALE

Pentru asigurarea capacităților necesare de înmagazinare a rezervoarelor se utilizează diferite **forme și sisteme constructive** dependente de proprietățile fizico - mecanice ale materialelor, începând cu piatra naturală (pentru capacități mici) cu comportare mecanică nesimetrică și terminând cu oțelul - material cu o comportare relativ simetrică la eforturile axiale de întindere și compresiune; între cele două materiale menționate, datorită avantajelor legate de protecția la foc și exigențele sanitare, betonul armat și mai ales betonul precomprimat (cu inele discrete de armătură pretensionată dispusă pe verticală, respectiv "continue", prin înfășurare deasă) au cunoscut o extindere deosebită la realizarea recipientilor de diferite forme și dimensiuni.

În ultimele decenii, în aplicații speciale, se utilizează și poliesteri armați cu fibre de sticlă (PAS), în structuri flexibile, singulare (numai PAS) sau în sisteme compuse PAS - beton armat, fiecare din materialele menționate potențând calitățile materialului obținut prin această asocieră.

După **forma în plan orizontal** se disting rezervoare **circulare** (în particular poligonale), cu avantajele cunoscute, respectiv **rectangulare**.

După poziția lor față de cota terenului amenajat (CTA), se evidențiază rezervoare supraterane, îngropate/subterane și parțial îngropate, cu avantajele ce decurg din efectele unei "precomprimări naturale" a peretelui cilindric (circular sau poligonal), în ipoteza unei împingeri axial simetrice a pământurilor de umplură în jurul construcției, cu condiția realizării unei umpluturi uniforme (la aceeași cotă).

Se menționează faptul că atât ansamblurile circulare cât și cele rectangulare pot fi alcătuite cu **elemente prefabricate cilindrice lungi**, astfel dispuse încât să poată fi utilizată deplasarea transversală a acestora în plan orizontal pentru obținerea efectului de "închidere a rosturilor verticale" sub însăși acțiunea încărcării hidrostatice.

Sub **aspectul continuității structurale** sau al procedeelelor folosite la realizare, se disting rezervoare de beton armat / precomprimat **monolite**, realizate din elemente **prefabricate** (prin segmentare verticală în cele mai frecvente cazuri, respectiv prin segmentare orizontală, sub formă de virole, în cazul rezervoarelor cu capacități relativ reduse, mai rar, în soluție mixtă).

În general, rezervoarele pot asigura înmagazinarea apei, a hidrocarburilor și, cu modificări specifice (prezența "acoperișului" deplasabil pe verticală), a gazelor.

Construcțiile terane pentru înmagazinarea lichidelor sunt acoperite cu sisteme rigide în planul lor, plane sau curbe, monolite sau prefabricate, respectiv cu sisteme flexibile (sub forma acoperișurilor suspendate, de mari deschideri, în cazul rezervoarelor de foarte mari capacități).*

Asigurarea continuității structurale este determinantă pentru satisfacerea condiției de etanșeitate.

Prelungirea stadiului de comportare elastică (reduc în cazul betonului armat, chiar în condițiile unui consum excesiv de armătură inelară, orizontală, respectiv al unei grosimii mari a peretelui) se realizează cu certitudine **prin precomprimarea pereților cilindrici** și chiar a pereților plani.

Armăturile pretensionate / active sunt dispuse după inele orizontale, la distanțe variabile, pe verticală, în interiorul secțiunii verticale a peretelui cilindric (în canale), respectiv în afara acestora (armătură pretensionată înfășurată); armătura pretensionată, discretă pe verticală, sub formă de fascicule din sârme paralele, este segmentată și blocată pe nervuri verticale exterioare (din rațiuni mecanice și tehnologice), numărul de segmente / nervuri fiind dependent de lungimea circumferinței medii a rezervorului.

Precomprimarea pe orizontală afină diagramei de eforturi axiale inelare se realizează prin înfășurarea armăturii de înaltă rezistență sub tensiune mecanică, în mod continuu, atât sub aspectul dispunerii la distanțe mici pe verticală cât și al utilizării aceluiași "fir", implicând un număr redus de blocaje intermediare; se precizează faptul că, în aceste condiții, se folosesc mijloace suplimentare pentru corectarea tensiunii din firul înfășurat, plasate între peretele cilindric și firul tensionat, cu rol de compensare a unor pierderi tehnologice de tensiuni.

Asamblarea elementelor prefabricate, plane sau cilindrice deschise, din beton armat sau beton precomprimat cu **armătură preîntinsă** în lungul acestora (pe verticala rezervorului) se realizează fie continuu (prin înfășurare), fie cu 2 sau 3 inele, orizontale (inele rare) de beton precomprimat cu fascicule postîntinse, reprezentând reazeme fixe la extremități (la nivelul legăturilor verticale perete - radier și perete - acoperiș), respectiv un reazem elastic intermediar pentru a obține o stare avantajoasă de solicitare, atât pentru elementul prefabricat (în fazele de manipulare, transport și exploatare) cât și pentru ansamblul obținut după recompunere.

La rezervoarele de mari dimensiuni apare oportună și **precomprimarea verticală** a pereților cilindrici din B P monolit.

În cazul rezervoarelor mici (50...100 m³), alcătuite din virole din beton armat (ele însele conținând elemente cilindrice deschise multiple, orientate cu convexitatea spre apă), în urma unor segmentări orizontale, refacerea continuității virolelor pe verticală, se asigură prin precomprimarea cu bare / tije groase din OIR, postîntinse.

Stabilitatea procesului de deformare a peretelui cilindric, respectiv răspunsul dinamic/seismic al ansamblului depinde de tipul radiatorului și modul de conlucrare al acestuia cu terenul de fundare, deformabil sau cu deformabilitate controlată (prin natura rocii sau prin prevederea de reazeme dese, cu transmitere la stratul de bază situat la mare adâncime).

4.2 SISTEME CONSTRUCTIVE REPREZENTATIVE

În România, printre cele mai mari rezervoare realizate după cel de al doilea război mondial, se poate enumera cel de 10000 m³ din București. Acesta a fost conceput (de tip "îngropat") pentru mărirea rezervei de apă și compensării variației debitului orar, necesare în alimentarea cu apă a municipiului, cu secțiune orizontală dreptunghiulară (50x60m); din punct de vedere constructiv acesta este alcătuit din pereți perimetrali din beton armat monolit, stâlpi interiori cu capiteli la contactul cu radierul și planșeul superior (planșee tip "ciuperci").

După 1956, în cadrul IPCT București, s-a trecut la elaborarea proiectelor tip pentru capacități de 50, 75, 100, 200, 300, 500, 750 și la de acoperire (cu folosirea cofrajelor de inventar), respectiv cu radierul rezemat, la rândul său, continuu pe stratul de beton de egalizare.

Izolarea hidrofugă se realizează cu tencuială de ciment în două straturi la interior și cu un strat de pânză TCA la exterior; izolarea termică se asigură prin acoperirea cupolei cu un strat de pământ cu grosimea de cel puțin 80 cm.

Proiectele tip au fost aplicate la realizarea, până în anii 1970 / 1971, a cel puțin 1500 de rezervoare cu diverse capacități (fig. 4.2.).

Proiectele tip elaborate de către IPCT BUCUREȘTI, pentru toate capacitățile de înmagazinare a apei, prevăd o placă plană de fund, elastică, cu grosime redusă, executată din beton armat Bc 22,5 (B 300), radierul devenind flexibil.

Cazul **rezervoarelor cu camere concentrice** (rezervoare din BA monolit cu diametre mari), amplasate pe terenuri cu pantă semnificativă este ilustrat în fig. 4.3. (2 x 1000 m³).

În vederea creșterii **gradului de industrializare a execuției** și obținerii de economii de resurse, în condiții optime de calitate, au fost adoptate soluții structurale noi, atât pentru capacitățile curente de 50...1000 m³, cât și pentru cele mai mari, de 10.000 m³, ce implică prefabricarea pereților cilindrici

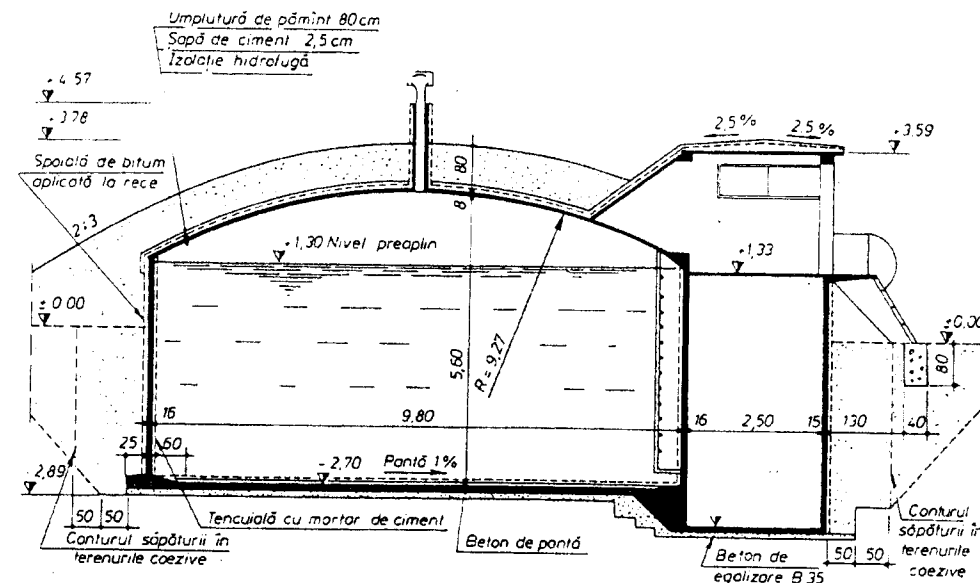


Fig. 4.1. Rezervor cilindric circular, singular, din BA monolit, "îngropat", de mică capacitate (300 m³).

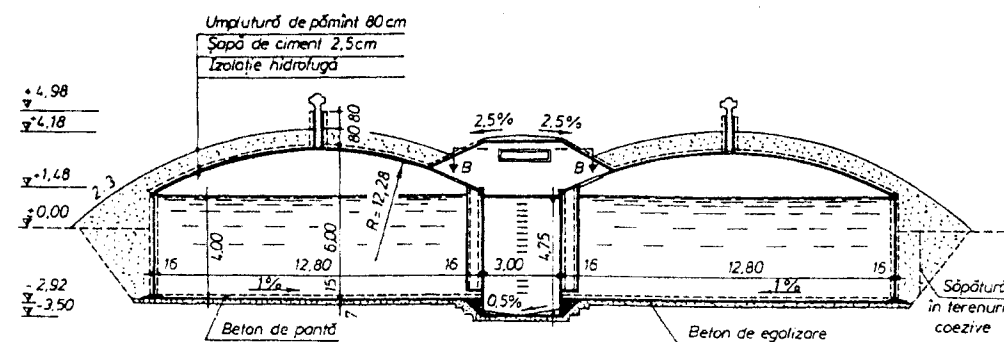


Fig. 4.2. Rezervoare cilindrice, circulare, cuplate, din BA monolit (2 x 500 m³).

și refacerea continuității prin precomprimare, respectiv prefabricarea acoperișului (utilizând elemente cu caracter linier de lucru, cu deschideri mari).

În 1964 a fost realizat la INCERC București un **rezervor experimental** cu diametrul interior 15,66 m și înălțimea de 3,80m, prin folosirea a 45 elemente prefabricate din beton precomprimat (BP), cu lățimea de 107,5 cm și grosimea de 12 cm și precomprimarea orizontală a ansamblului, după monolitizarea rosturilor verticale dintre panouri (pene de beton cu altă vârstă, de formă specială), prin **înfășurarea sub tensiune mecanică** a unor sârme din oțel de înaltă rezistență (OIR), cu ajutorul unei instalații speciale tip ANM – 5 (URSS / Rusia); acest procedeu permite precomprimarea rezervoarelor cilindrice/multipoligonale cu diametre de 10...42 m și înălțimi de maximum 8,50 m.

Elementele prefabricate de perete se realizează din beton precomprimat (B400) cu armătură longitudinală preîntinsă și prezintă o ușoară curbură în direcția inelară; ansamblarea pe orizontală se realizează prin înfășurare continuă cu sârmă sub tensiune mecanică.

În 1959, IPCH București proiectează un rezervor de 2000 m³ pentru Uzina de Fibre Sintetice, aplicând un procedeu de precomprimare similar "cercurilor de la butoaie" (fig. 4.4), cu armătură postîntinsă pe fața exterioară a peretelui tronconic ($d_{ext} = 23$ m, $d_{min} = 22,04$ m, $H = 6$ m); rezervorul este de tip îngropat, cu o umplutură de pământ pe acoperiș plan de 80 cm pentru asigurarea izolării termice.

Pereții rezervorului, executați din B 300, cu grosimea de 16 cm, prezintă vute de racordare (cu panta 1:12) cu acoperișul și radiatorul.

Armătura inelară pretensionată a fost alcătuită din **fascicule plate** din 4 ϕ 5 mm SBP I, derulate pe exteriorul peretelui tronconic pe bare verticale de ghidare (ϕ 10 mm la 30 cm distanță între ele), fixate la capete pe rezervor.

Sârma utilizată la pretensionare este înnădită în lungul ei prin strângere în plăci sandviș ondulate și este blocată la extremități cu pene tip Magnel, fixate în peretele rezervorului; pentru atingerea efortului de control a fost necesară o

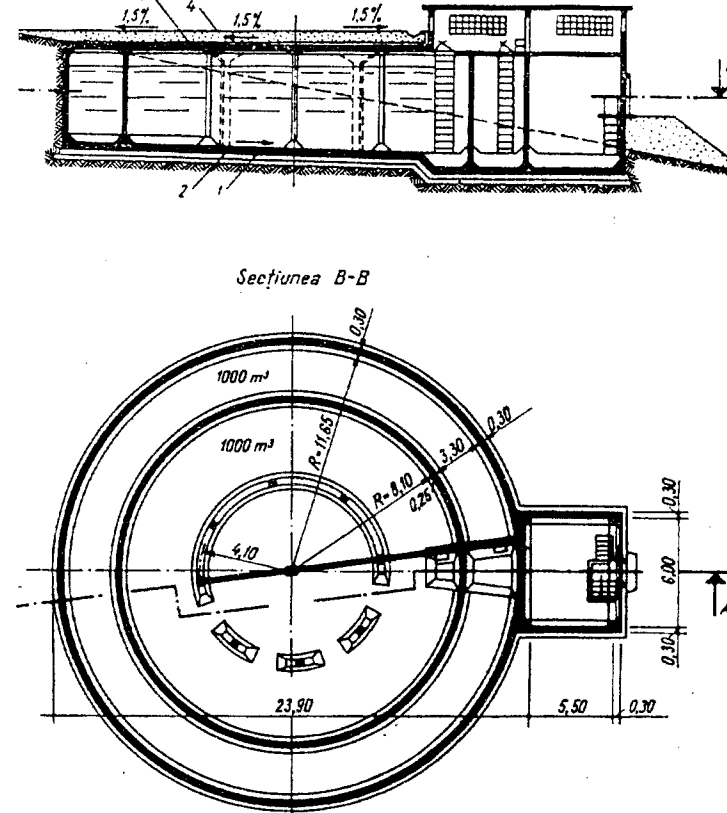


Fig. 4.3. Rezervor cilindric circular din BP monolit, cu camere concentrice, "semiîngropat" (2 x 1000 m³): a - secțiune verticală; b - secțiune orizontală.

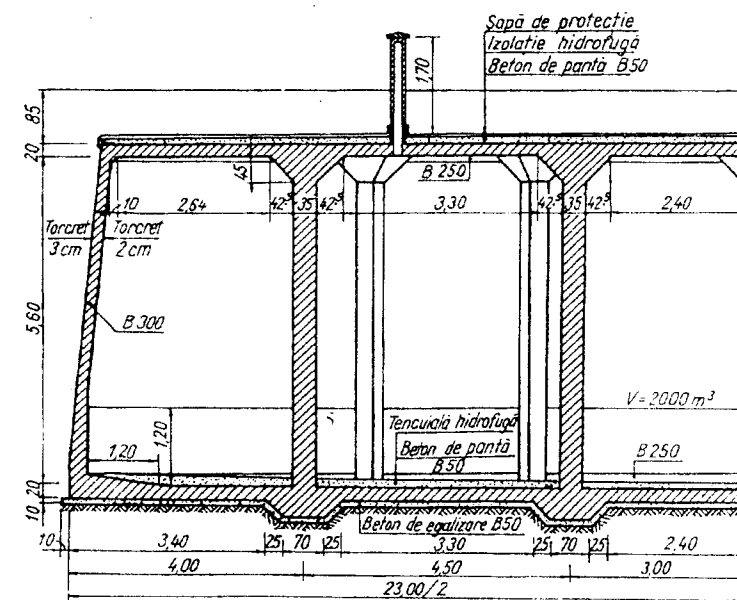


Fig. 4.4. Rezervoare tronconice din BP, cuplate, îngropate, cu capacitatea de 2 x 2.000 m³ (Uzina de Fibre Sintetice Săvinești).

deplasare pe verticală a inelului de armătură de 60 cm, parcursă în 5 etape succesive.

Protecția contra coroziunii a armăturii pretensionate a fost realizată cu ajutorul unui strat de mortar de ciment, cu grosimea de 3 cm, aplicat prin torcretare.

Precomprimarea inelară cu fascicule anfilate în canale prevăzute în grosimea pereților cilindrici și ancorate în nervuri exterioare din BA monolit nu este aplicabilă la pereți cilindrici prefabricați; la propunerea Catedrei de Beton Armat din Iași, începând din 1976, s-a aplicat **precomprimarea cu fascicule răsfirate** (rezervoare și decantoare la Deva, Simeria, Hunedoara, Săvinești, Suceava, Petroșani), procedeu în care fasciculele sunt blocate în nervuri, după detaliile curente, însă pe distanța dintre nervuri acestea sunt răsfirate cu ajutorul unor "piepteni de distanțare" (armătura din OIR fiind plasată în exteriorul secțiunii verticale a peretelui); protecția contra coroziunii se asigură prin torcretarea intervalelor dintre nervuri și prin injectarea canalelor orizontale scurte, aferente numai nervurilor.

Creșterea continuă a necesarului de apă pentru populație și industrie a condus la sporirea corespunzătoare a capacităților de înmagazinare (volume mai mari pentru avarie, pentru incendii simultane mai frecvente etc).

În România, ISLGC / PROED București a elaborat proiecte de rezervoare cilindrice cu capacități de 10.000 și 20.000 m³, respectiv rezervoare paralelipipedice, complet îngropate în teren, cu capacități de 40.000 m³; în acest sens, se menționează rezervoarele realizate între anii 1970 și 1982 la Ploiești (2 x 10.000 m³), Iași (2 x 10.000 m³), Constanța, Galați (2 x 20.000 m³) și București (40.000 m³).

Proiectarea, execuția și exploatarea rezervorului de mare capacitate /1/ au ridicat aspecte noi în tehnica construcțiilor hidroedilitare, datorită faptului că față de rezervoarele de capacitate redusă, îngropate în teren sau semiîngropate, cele cilindrice de 10.000...20.000 m³ sunt practic supraterane cu îngropare minimă în teren până la stratul de pământ cu caracteristici geotehnice corespunzătoare sau prin prevederea unui radier pe piloți.

Rezervorul din BP, executat la Galați (fig.4.5) are diametrul interior al peretelui cilindric de 50 m și este amplasat pe un teren macroporic, sensibil la umezire; sub radier s-a realizat o pernă din loess, îmbunătățită prin cilindrare, cu grosimea de 2,50 m; peretele cuvei are grosimea constantă și egală cu 20 cm (48 cm în dreptul nervurilor). În vederea evitării înghețării apei în timpul iernii și încălzirii accentuate în timpul verii s-a executat, la exterior o termoizolație din beton ușor de granulat (argilă expandată).

Acoperișul, rezemat pe două șiruri interioare concentrice de stâlpi prefabricați, monolitizați în centuri inelare cu "pahare", este alcătuit din chesoane prefabricate cu extradados plan.

Izolația termică a acoperișului cuprinde un strat de egalizare de 2 cm, carton asfaltat, un strat de polistiren expandat, carton asfaltat și bitum, șapă armată de ciment pentru protecția termoizolației (3 cm), două straturi de pânză și unul de carton asfaltat lipite de bitum, cu rol de hidroizolație și o altă șapă armată pentru protecția hidroizolației.

Controlul exfiltrațiilor de apă se asigură prin galeria concentrică de vizitare, acoperită cu dale de beton.

Peretele rezervorului este precomprimat pe orizontală cu fascicule inelare segmentate (12 ϕ 7 SBP I) blocate în 8 nervuri, respectiv pe verticală.

Radierul este conceput sub forma unei plăci plane flexibile din beton armat pe mediu elastic.

Ansamblul este conceput pentru preluarea acțiunilor statice specifice tipului de construcție, precum și a celor hidrodinamice corespunzătoare gradului 8 de intensitate macroseismică, conform codurilor de proiectare seismică din acea perioadă (P13 - 70; P100 - 81).

Legătura perete - radier (BH 300, P12) este de tip "articulație", fiind realizată din profil plastifiat din PVC și benzi de cauciuc (permite rezemarea "liberă" a bazei peretelui pe radier și o deplasare radială limitată în timpul precomprimării); această soluție asigură rotirea liberă a peretelui față de radier în exploatare, împiedicând orice deplasare radială a peretelui, fără a afecta etanșeitatea cuvei.

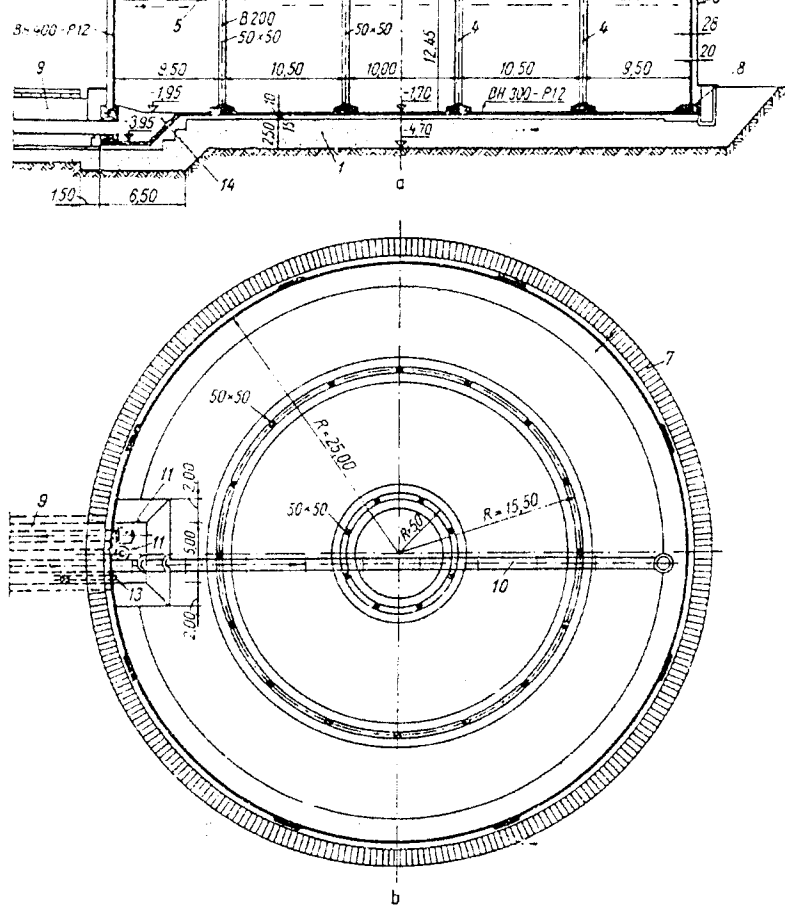


Fig. 4.5. Rezervor cilindric circular suprateran din BP cu două cuve concentrice de câte 20.000 m³ capacitate, executat la Galați: a - secțiune verticală; b - secțiune orizontală.

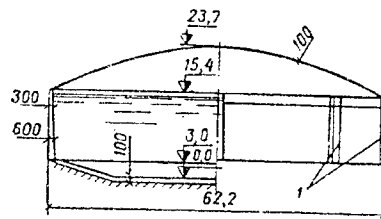


Fig. 4.5. A. Rezervor din BP de 45.000 m³ capacitate, realizat în SUA: 1 - nervură pentru ancorarea armăturii pretensionate.

În fig. 4.5.A este prezentat un rezervor cilindric pentru apă cu capacitate de 45.000 m³, realizat în Oakland (SUA); se caracterizează prin diametrul exterior de 62,2 m și înălțimea apei din rezervor de 12,2 m; peretele cilindric are grosime variabilă de la 60 cm la 30 cm spre partea superioară. Radierul are formă tronconică. Peretele cilindric este precomprimat pe orizontală și verticală.

Rezervoarele cu secțiune circulară cu pereți verticali sunt mai economice decât cele rectangulare, deoarece solicitarea principală a pereților este forța axială inelară și nu momentele încovoietoare ca în cazul rezervoarelor rectangulare.

Ideea prevederii unui radier pe piloți / coloane din beton armat / precomprimat, se regăsește la rezervorul paralelipipedic de 50000 m³ realizat în Belgia la Eupen (fig.4.6).

În fig.4.7 se evidențiază alcătuirea unui rezervor rectangular/paralelipipedic, de 200.000 m³, din cuve de beton parțial precomprimat (BPP), cu compartimente suprapuse, în interiorul unei incinte din elemente cilindrice, realizat în Franța la Porte de Lilas-Paris; caracteristicile sistemului constructiv menționat reies din fig. 4.8 a,b,c; între cele două cuve este prevăzută o galerie cu lățimea de 10 m, în care sunt plasate instalațiile necesare pentru exploatarea rezervorului. Ambele cuve sunt închise într-o incintă care asigură, atât lateral cât și sub cuve, spații vizitabile pentru verificarea etanșeității rezervorului.

Pereții laterali ai incintei sunt alcătuiți din elemente cilindrice cu generatoarele verticale rezemate pe nervuri legate de cuve în dreptul celor trei planșee. Radierul general este conceput sub forma unei plăci nervurate. Pereții laterali sunt precomprimați astfel încât fețele interioare în contact cu apa, să fie permanent comprimate. Nervurile verticale ale pereților laterali sunt legate de planșee cu ajutorul unor tiranți oblici.

Planșeele inferior și cel intermediar al fiecărei cuve sunt alcătuite din plăci dispuse pe o rețea ortogonală de grinzi precomprimate. Planșeul de acoperiș este constituit din plăci curbe subțiri cu dublă curbura rezemate pe o rețea ortogonală de nervuri precomprimate.

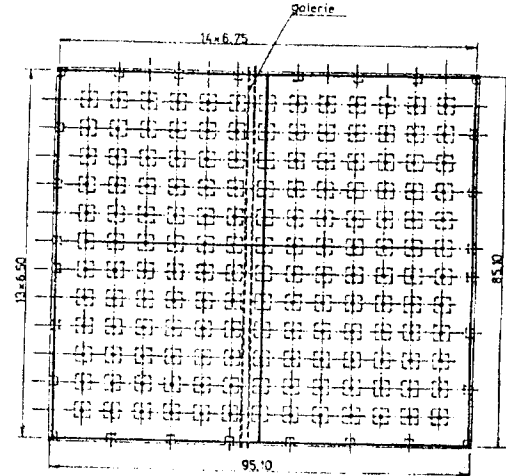


Fig. 4.6.
Rezervor rectangular
din BP parțial, cu
capacitatea de
50.000 m³, realizat la
Eupen - Belgia.

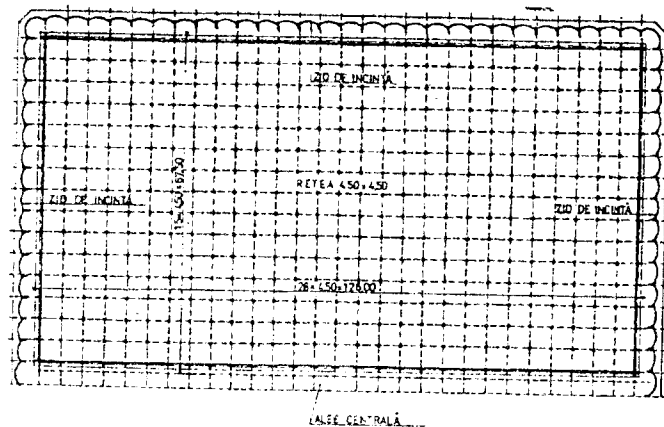
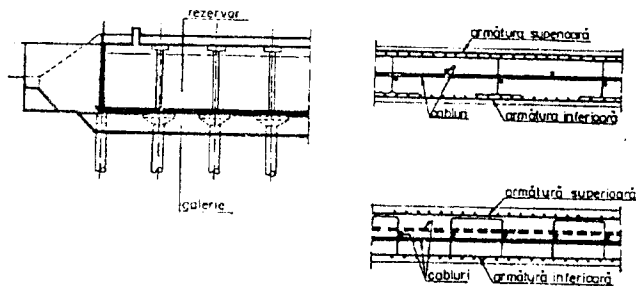


Fig. 4.7. Rezervor rectangular de mare capacitate (200.000 m³),
din cuve de BP parțial, în interiorul unei incinte
din elemente cilindrice, executat în Franța
(Porte de Lilas - Paris).

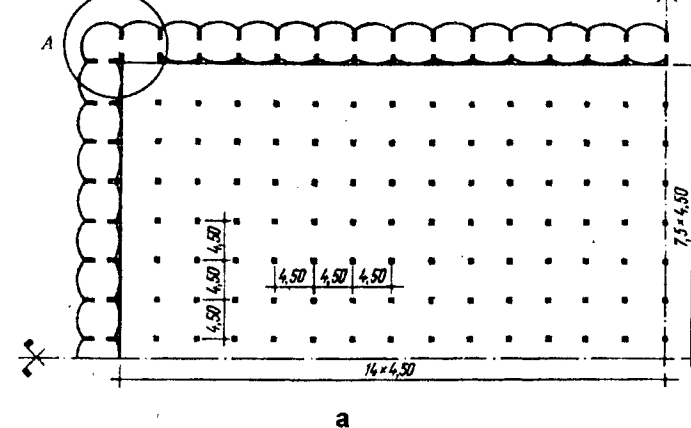
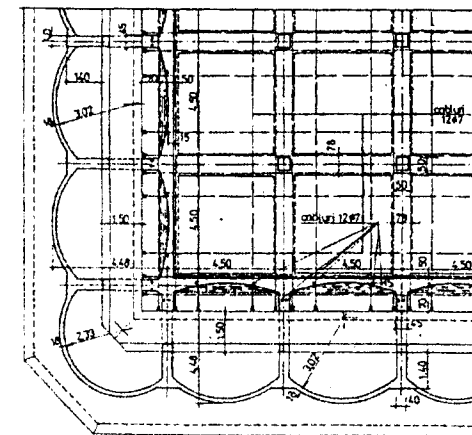
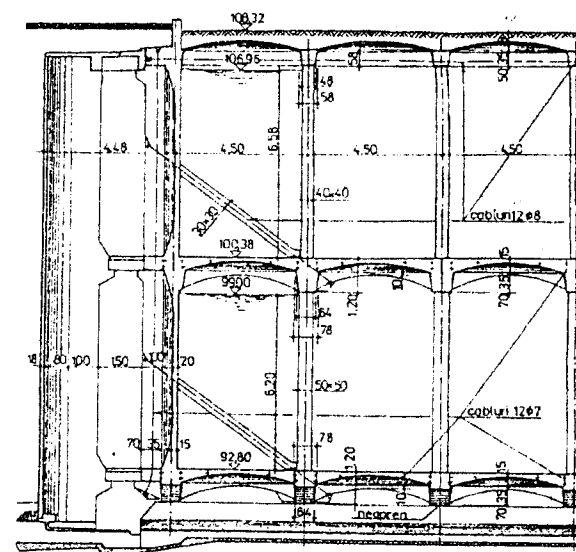


Fig. 4.8.
Alcătuirea
constructivă a unui
rezervor de 200.000
m³, realizat în Franța:
a - caracteristici
geometrice generale;
b - detaliu secțiune
orizontală;
c - secțiune verticală.



b



c

Se precizează faptul că fiecare cuvă este o construcție din beton parțial precomprimat, rezemată pe radierul general prin intermediul unor aparate de reazem din neopren.

Diferitele elemente ale ansamblului (fund, pereți verticali, acoperiș) au fost betonate în părți succesive și au fost prevăzute cu armătură pasivă pentru asigurarea rezistenței necesare în timpul execuției; după întărirea betonului s-a realizat precomprimarea orizontală și verticală, respectiv injectarea canalelor.

Un **rezervor circular descoperit** (perete cilindric cu grosime linear variabilă), cu capacitatea de 35.000 m^3 , este prezentat în fig. 4.9.

Realizări spectaculoase se înregistrează în **domeniul înmagazinării hidrocarburilor**; rezervoarele pentru hidrocarburile extrase din Marea Nordului de către EKOFISK ilustrează (fig. 4.10) posibilitățile multiple de utilizare a betonului precomprimat parțial, respectiv de combinare a funcțiilor rezervor propriuzis – incintă de protecție; partea de rezervor a ansamblului servește pentru plutire în timpul execuției și remorcării cu mijloace specifice, iar incinta de protecție (perforată) minimizează sarcinile la care acesta este supus.

Prin **prefabricarea rezervoarelor** se obțin soluții economice, ce implică reduceri de 15...20 % de beton, 10...15% de oțel, respectiv de 25...30% la manoperă; în același timp, se poate asigura reducerea duratelor de execuție, cu măsuri suplimentare minime, mai ales în cazul țărilor cu perioadă rece mai îndelungată.

În general, se prefabrică mai ales pereții și acoperișurile rezervoarelor, primele componente realizându-se, în principiu, în două variante: a) din panouri prefabricate lungi, cu rosturi verticale; b) din virole din BA / BP, cu rosturi orizontale (situație optimă) și uneori verticale.

Panourile prefabricate pot fi concepute cu grosime constantă (dacă lungimea/înălțimea acestora nu depășește 6 m) sau cu secțiune transversală chesonată.

Rosturile dintre panourile verticale au fie grosimi reduse (1...5 cm), fie mai mari de 10 cm. Elementele prefabricate cu

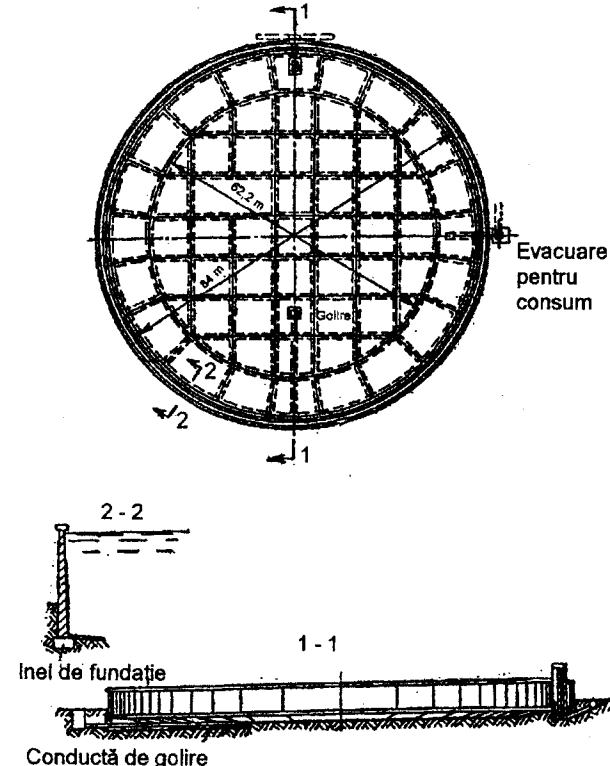


Fig. 4.9. Rezervor din BP cu capacitatea de 35.000 m^3
(similar celor executate la Salisbury - Africa de Sud).

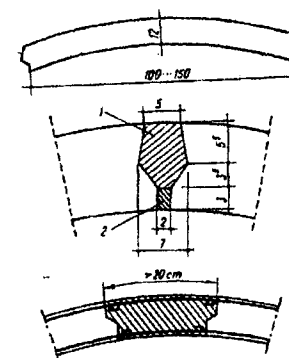
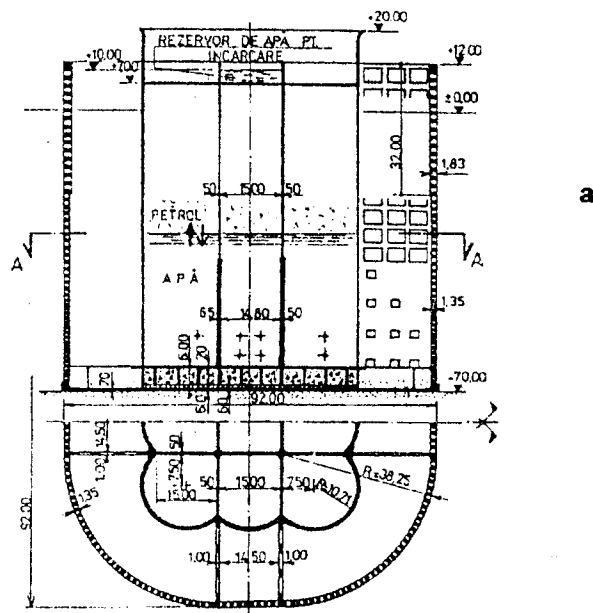
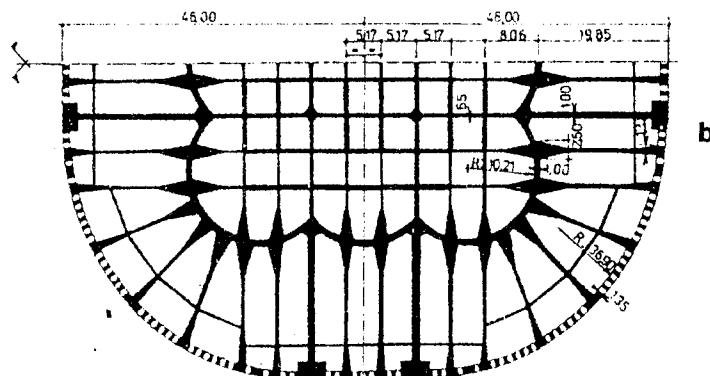


Fig. 4.11.d.
Rosturi între panouri prefabricate pentru realizarea pereților cilindrici: 1 - mortar introdus sub presiune; 2 - mastic bituminos aplicat înainte de realizarea precomprimării peretelui.



a



b

Fig. 4.10. Alcătuirea constructivă a rezervorului de hidrocarburi pentru EKOFISK, amplasat în Marea Nordului: a - secțiune verticală; b - secțiune orizontală.

grosime redusă se folosesc la recompunerea rezervoarelor prin precomprimare orizontală / inelară.

La un rezervor de capacitate redusă (fig. 4.11), de 300 m³, alcătuit din elemente prefabricate asamblate prin precomprimare, execuția începe cu turnarea radierului și continuă cu montajul elementelor prefabricate de perete, monolitizarea rosturilor verticale cu mortar de ciment, întărirea acestora și pretensionarea inelelor de armătură; se betonează rostul dintre peretele cilindric continuizat și radierul rezervorului, respectiv se realizează protecția armăturii pretensionate inelare cu mortar de ciment aplicat prin torcretare.

Cupola, concepută din elemente prefabricate, se obține după legarea acestora la partea inferioară (în zona nașterilor), cu ajutorul unui inel din BP (supus la întindere axială), inelul superior de reazem central (de creștet) fiind supus la compresiune.

În fig. 4.12 se evidențiază o reprezentare spațială a unui rezervor circular din BP (de 30.000m³), cu grad avansat de prefabricare, pentru înmagazinarea hidrocarburilor; elementele prefabricate de perete, cu dimensiunile 2,1 x 9,64 m, sunt precomprimate după generatoare; grosimea acestora variază între 15,7 cm și 26 cm, greutatea nedepășind 10 tf.

Precomprimarea de asamblare pe orizontală s-a realizat prin înfășurare cu sârme din OIR cu diametrul de 10 mm, cu ajutorul instalației ANM – 5.

Folosirea unor elemente prefabricate cu secțiune transversală curbă, cu convexitatea spre apa din cuvă, devine avantajoasă chiar și în cazul rezervoarelor rectangulare.

Astfel, pentru rezervoarele din această categorie, se poate menționa rezervorul suprateran executat în 1977 (fig.4.13) la Combinatul Petrochimic Timișoara, cu o capacitate de 2 x 3500 m³, pentru apă de incendiu; se menționează existența unor elemente speciale de colț care se execută pe loc, compensând eventualele abateri (limitate) apărute la montajul elementelor curente, prefabricate din BP pe verticală; monolitizările rosturilor verticale dintre elementele prefabricate curente reprezintă extinderi ale nervurilor acestora, cu rol semnificativ în rigiditatea laterală a ansamblului.

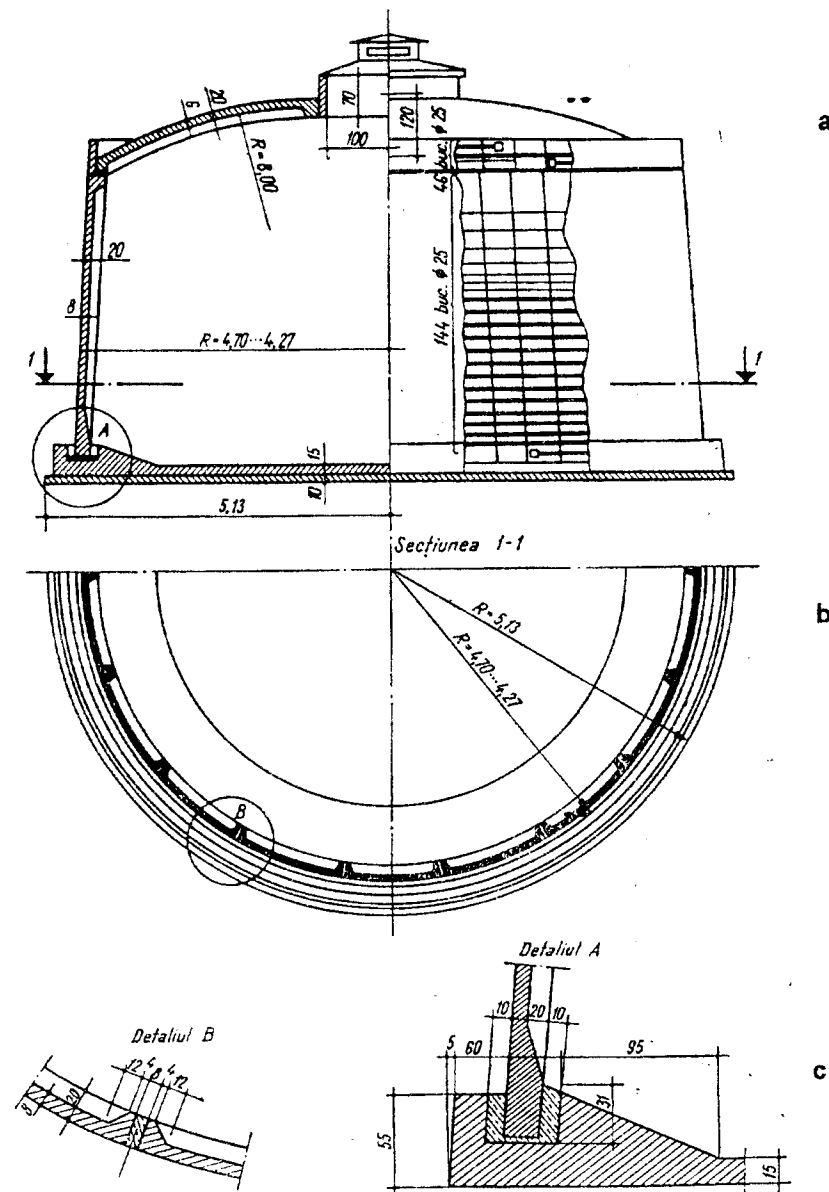


Fig. 4.11. Rezervor de mică capacitate, alcătuit din **elemente prefabricate** din BA, asamblate prin precomprimare:
 a - secțiune verticală; b - secțiune orizontală;
 c - detalii îmbinări caracteristice.

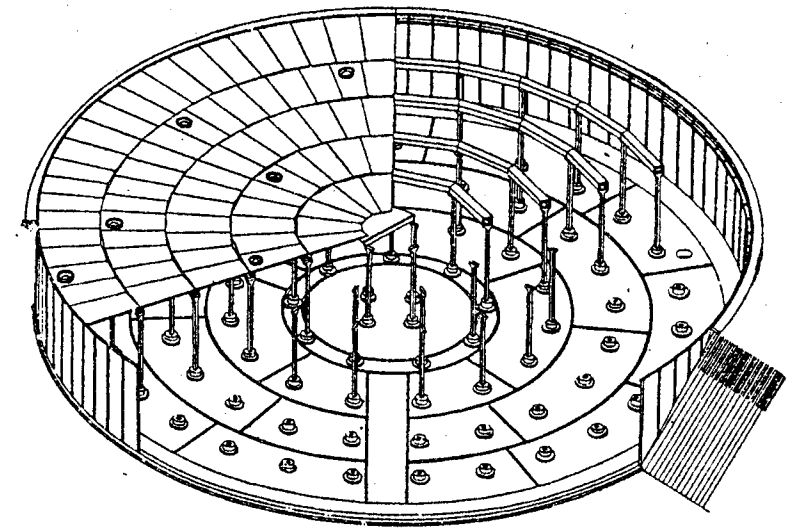


Fig. 4.12. Rezervor cilindric circular, integral prefabricat, asamblat prin precomprimare, pentru produse petroliere, cu capacitatea de 30.000 m^3 .

În fig. 4.14 se prezintă un rezervor rectangular (de formă pătrată în plan orizontal), îngropat, cu suprastructura integral prefabricată; panourile prefabricate de pereți sunt rigidizate cu ajutorul stâlpilor marginali/perimetrali; detaliile de alcătuire și armare pentru nodurile caracteristice acestui sistem [3] sunt date în fig. 4.15.

Capacitățile mari de înmagazinare și forma rectangulară în plan orizontal impun adoptarea **rezervoarelor îngropate parțial** (fig. 4.16), cel puțin 80% din volumul total (București, 40.000 m³).

Având dimensiuni generale de 74,025 x 99,35 m, radierul este prevăzut cu două **rosturi de dilatare definitive** transversale și un rost longitudinal, care generează 6 panouri distincte de placă groasă pe mediu elastic.

Peretele rezervorului a fost conceput / realizat ca fiind continuu cu radierul.

Susținerea acoperișului (elemente prefabricate plane 1,50 x 6, 0 m și grinzi preturnate pe șantier) se realizează cu o rețea (tramă) de stâlpi interiori din BA de 6 x 6 m.

Extradosul radierului rezervorului este prevăzut cu o pantă pe ambele direcții, realizându-se astfel o rigolă lângă peretele longitudinal, care poate conduce apa de spălare spre bașa rezervorului.

O soluție interesantă pentru rezervoarele supraterane cu capacitatea de 35.000 m³ a fost aplicată în Rotterdam (Olanda, fig. 4.17). Acoperișul sub formă de cupolă cu deschiderea minimă de 76,84 m, se caracterizează prin grosimea plăcii de 15 cm la creștet și 25 cm spre nașteri, respectiv prin existența unui inel de rezemare din beton precomprimat, dispus, la rândul său, pe stâlpi plasați pe o fundație inelară exterioară cu diametrul de 85,6 m. Atât radierul cât și fundația inelară exterioară transmit acțiunile care le revin la terenul bun de fundare prin intermediul unor piloți din BA / BP.

Peretele tronconic al rezervorului este realizat din beton precomprimat și preia numai acțiunea hidrostatică, cupola transmitând propriile încărcări la stâlpi prin intermediul inelului de rezemare.

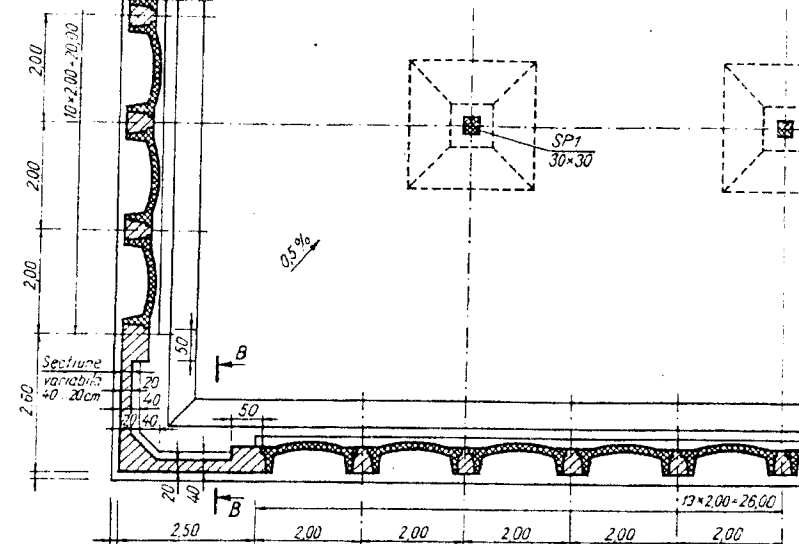


Fig. 4.13. Rezervor rectangular din elemente prefabricate din BA, cu capacitatea de 3500 m³, executat în 1977, la Combinatul Petrochimic "Solventul" din Timișoara.

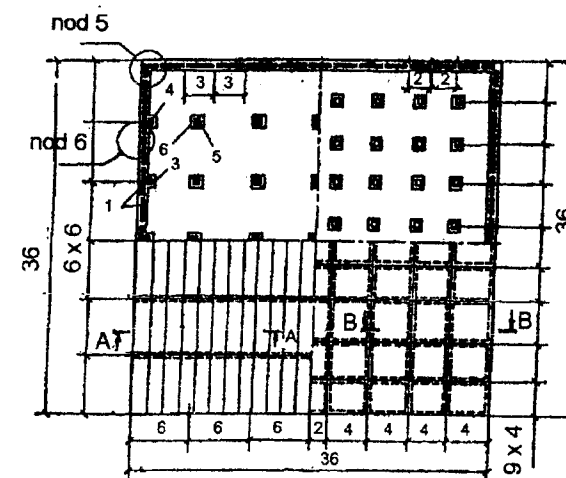


Fig. 4.14.a. Secțiune orizontală rezervor rectangular din elemente prefabricate: 1 - panou de perete; 2 - radier monolit; 4 - stâlp marginal; 5 - stâlp interior; 6 - bloc de fundație.

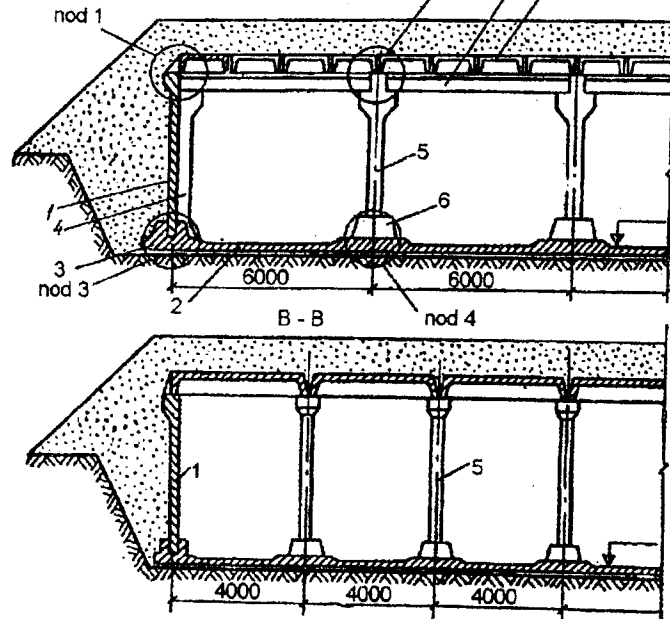


Fig. 4.14 (b, c). Secțiuni caracteristice rezervor rectangular alcătuit din elemente prefabricate: b - secțiune verticală transversală (A - A); c - secțiune verticală longitudinală (B - B); 1 - panou de perete; 2 - radier monolit; 3 - inel de fundație pentru pereți; 4 - stâlp marginal; 5 - stâlp interior; 6 - bloc de fundație; 7 - grindă transversală; 8 - cheson de acoperiș.

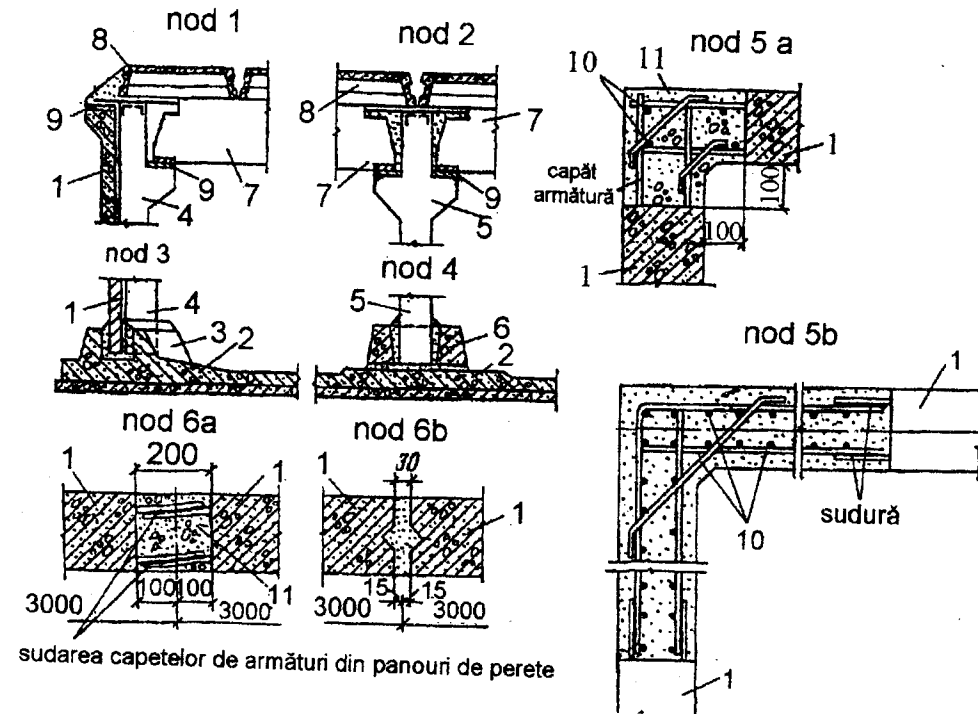


Fig. 4.15. Detalii armare noduri: 1 ... 8 - idem fig. 4.14 (b, c); 9 - placă metalică; 10 - armături verticale în zona de monolitizare; 11 - beton turnat in situ.

Legăturile peretelui tronconic cu radierul și intradosul cupolei sunt elastice, fiind realizate din neopren.

În cazul unor capacități mai mici (2.500 m^3) se poate aplica sistemul constructiv din fig. 4.18; peretele tronconic este continuu cu radierul rigid cu extensie relativ redusă în plan orizontal; blocarea armăturilor inelare pretensionate se asigură cu mijloace mecanice rezemate pe nervuri exterioare, în mod similar rezervoarelor cilindrice.

Cupola este articulată de peretele tronconic, transmițând încărcările verticale ce-i revin la perete prin intermediul unui inel de rezemare din BP; acest tip de sistem a fost aplicat în orașul Ronda din Spania.

În cazul rezervoarelor de foarte mare capacitate se pot adopta soluții diferite pentru realizarea părților componente.

Astfel, rezervorul stației de epurare a apei din Durban (Republica Sud Africană), cu capacitatea de 284.000 m³, are aspectul general al unui cort (diametrul interior este egal cu 167,6 m); acoperișul, de tip suspendat de un turn central și un inel exterior din BA (supus la compresiune), a fost realizat din 120 de cabluri radiale și panouri prefabricate de placă inserate în ochiurile definite de familiile de cabluri, astfel încât să se prevină fenomenul de "filfiire" a acoperișului.

Rezervorul propriu-zis, de formă tronconică reazemă continuu pe teren, cu efecte favorabile asupra variației eforturilor secționale și a deplasărilor radiale.

În cazul sistemelor monolite, cu acoperiș tip cupolă, se realizează radierul și apoi peretele cilindric, cu legături minime în zona de contact, în vederea executării precomprimării orizontale, cupola urmând a fi realizată ulterior, ceea ce mărește durata de execuție.

Introducând o legătură inelară elastică la nivelul contactului perete cilindric-inel de rezemare a cupolei, ca în fig.4.20, se crează condiții pentru precomprimarea peretelui cilindric și după execuția cupolei de acoperiș.

Ancorarea armăturii postîntinse, alcătuită din fascicule din sârme paralele, fascicule răsfirate sau lițe/toroane, se realizează cu mijloace mecanice ce reazemă (prin intermediul unor plăci metalice superficiale, de repartitie, sau prin folosirea

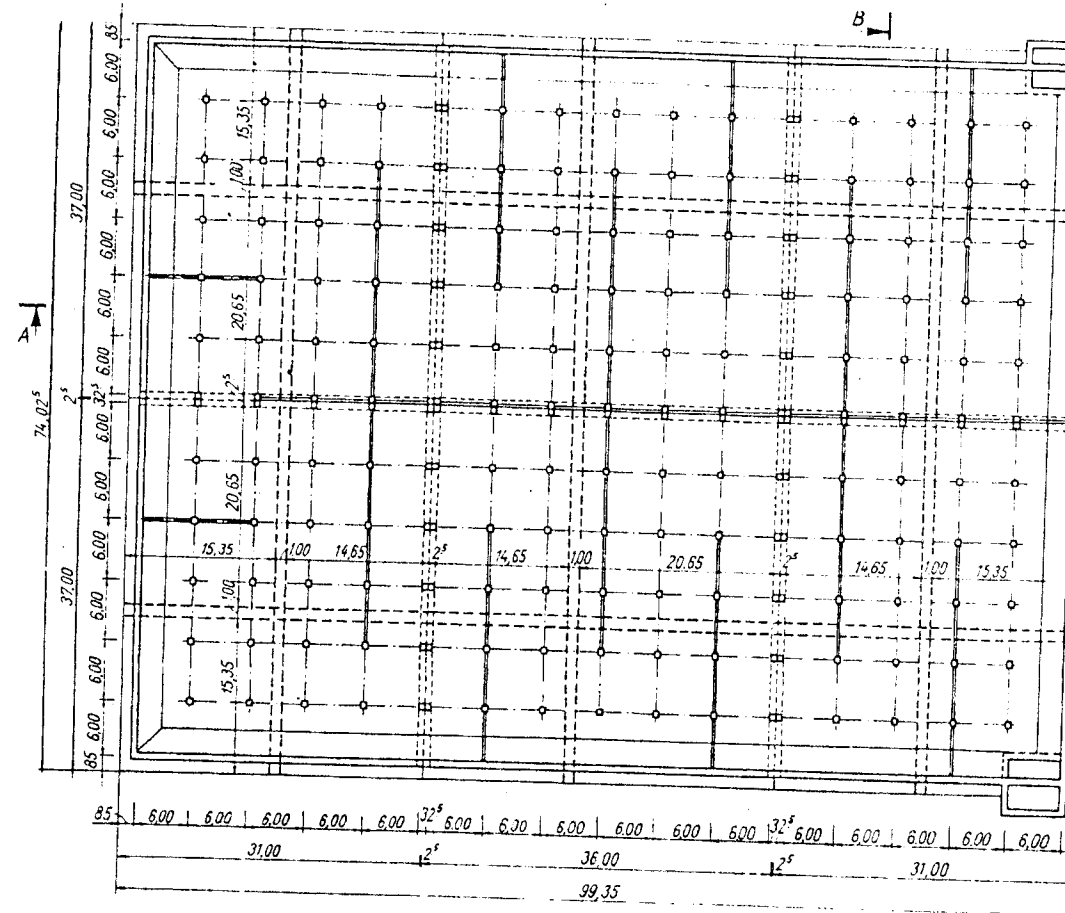


Fig. 4.16. Rezervor rectangular din elemente prefabricate, **îngropat**, cu capacitatea de 40.000 m³, executat în București.

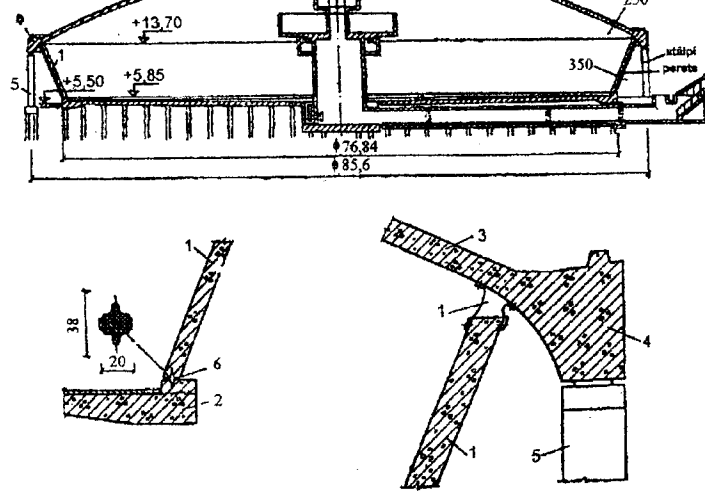


Fig. 4.17. Rezervor "tronconic" de mare capacitate (35.000 m^3), acoperit cu o cupolă rezemată (discret) pe stâlpi din BA, în Rotterdam - Olanda: a - secțiune verticală; b - detalii legătură articulată perete tronconic - radier; c - detalii legătură articulată perete tronconic - cupolă; 1 - perete tronconic; 2 - radier; 3 - placă curbă, subțire (cupolă) din BA; 4 - inel din BP pentru rezemarea cupolei; 5 - stâlpi din beton armat; 6 - inel de etanșare din cauciuc/neopren; 7 - legătură flexibilă din neopren.

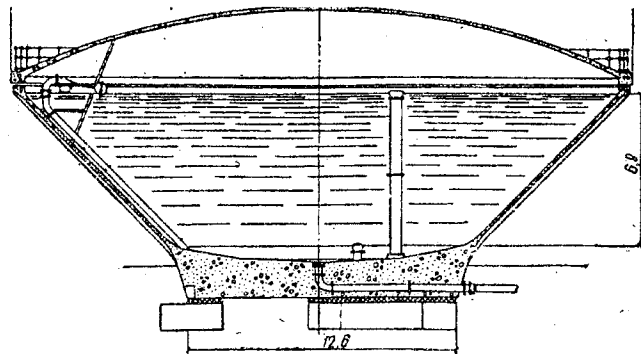


Fig. 4.18. Rezervor suprateran cu perete tronconic din BP, continuu cu radierul și "articulat" de cupola de acoperire (capacitatea de 2500 m^3), realizat în Ronda - Spania.

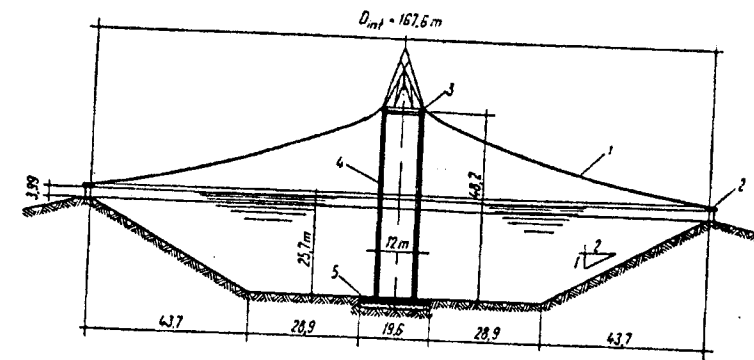


Fig. 4.19. Rezervor de capacitate foarte mare cu "perete" tronconic rezemat continuu pe teren și acoperiș pe cabluri (284.000 m^3 ; Durban - Africa de Sud) de oțel suspendate de un turn central: 1 - cabluri din oțel; 2 - inel exterior din BA; 3 - inel central; 4 - turn central; 5 - radier turn.

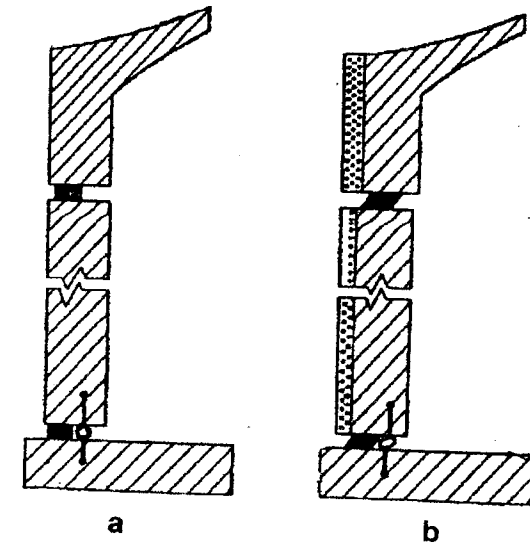


Fig. 4.20. Tipuri de legături "articulate" perete radier (cu lă de etanșare din cupru) și perete cilindric - cupolă de acoperire (cu material deformabil de tip neopren): a - în starea inițială; b - după executarea precomprimării peretelui.

unor mijloace din beton foarte rezistent înglobate în betonul structurii) pe nervuri din beton armat (fig. 4.21.a), respectiv din profile metalice rezemate după generatoarea peretelui cilindric (fig. 4.21.b). În cazul rezervoarelor monolite, paramentul interior al peretelui cilindric este uniform, spre deosebire de cazul alcătuirii acestora din elemente **prefabricate cilindrice nervurate** (fig. 4.22), avantajoase atât în fazele de **precomprimare longitudinală** cu armături preîntinse (tip TBP 12), pe ambele fibre ale secțiunii transversale, realizabilă în fabrică, de **manipulare și transport**, cât și în fazele de **exploatare curentă** (sub acțiunea hidrostatică), respectiv la **acțiunea unui cutremur probabil** în amplasament (presiunea hidrodinamică a apei și forțele inerțiale induse în structură), prezentând o capacitate portantă semnificativă la jocul potențial al momentelor încovoietoare ce solicită secțiunea transversală a acestora.

Același principiu se regăsește în lucrările elaborate de către cercetătorii ieșeni [8], referitoare la concepția rezervoarelor din elemente prefabricate cilindrice, respectiv conoidale, precomprimare cu toroane preîntinse rectilinii (în nervuri și după generatoarea ce corespunde fibrei extreme opuse de beton); prin forma lor proprie care le conferă rigiditatea necesară la transport și deformabilitatea laterală (după inelul din care au fost extrase prin operația de fragmentare/segmentare) sub acțiunea presiunii hidrostatice în exploatare, realizând efectul de "autoînchidere" a rosturilor verticale (fig. 4.24) în funcție de capacități și exigențe privind răspunsul seismic așteptat al acestor sisteme, se prevăd două inele extreme din BP pe înălțimea rezervorului sau, suplimentar, și unul intermediar astfel plasat încât suprafețele diagramelor de momente încovoietoare, pe fibrele extreme, în plan vertical, să fie comparabile; cu alte cuvinte, inelul intermediar va funcționa ca un **reazem interior elastic** (fig. 4.24.c), cu caracteristici dirijate de deformare în plan orizontal, în funcție de gradul de precomprimare axială a inelului din BP.

În fig. 4.25 este evidențiat aspectul unei virole cilindrice compusă din elemente cilindrice prefabricate din BA cu convexitatea spre interior (opusă acțiunii apei), utilizabilă

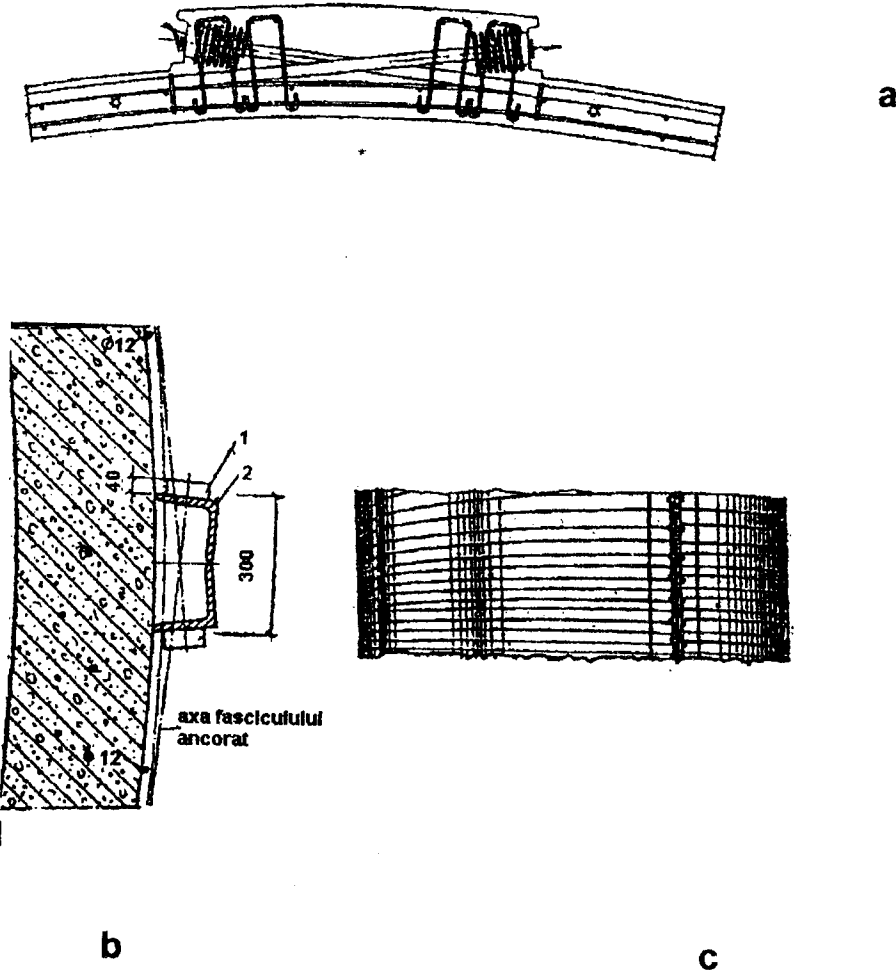
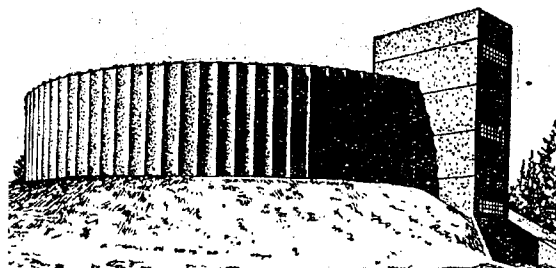
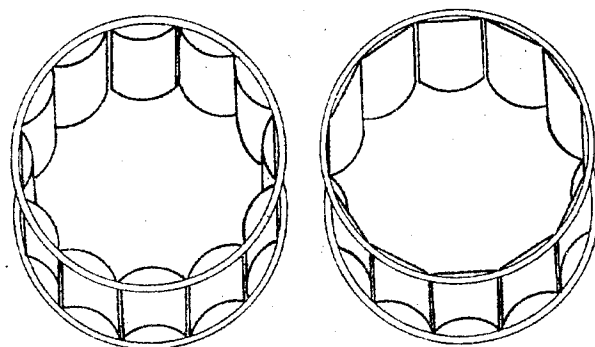


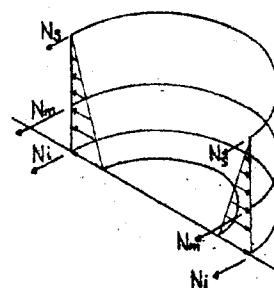
Fig. 4.21. Modalități de ancorare a armăturii pretensionate segmentate: a - în nervuri verticale exterioare din beton; b - în nervuri verticale realizate din profile metalice rezemate după generatoarea peretelui cilindric; c - distribuția armăturilor pretensionate pe înălțimea peretelui cilindric.



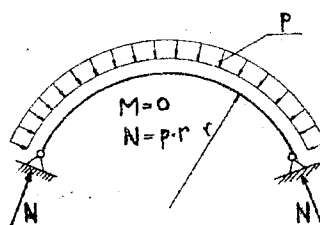
Rezervor cilindric
suprateran cu
capacitatea de
8.000 m³, alcătuit din
**elemente cilindrice
prefabricate** cu
convexitatea spre
interior (Suedia).



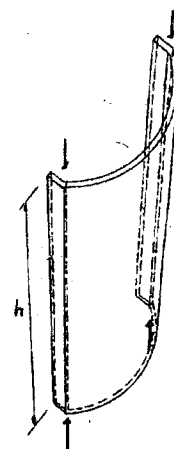
a



b

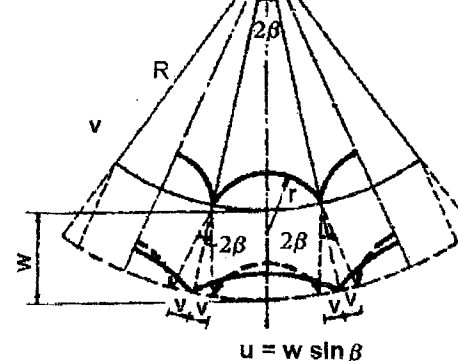


c



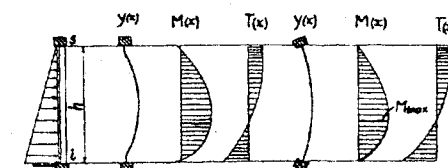
d

Fig. 4.23. Alcătuirea de principiu a rezervoarelor cilindrice din elemente cilindrice sau conoidale prefabricate din BP cu armătură preîntinsă, asamblate cu două sau trei inele orizontale din BP cu armătură postîntinsă: a - ansamblu; b/c - schema de calcul pentru ansamblu/element component; d - element prefabricat conoidal cu nervuri longitudinale.

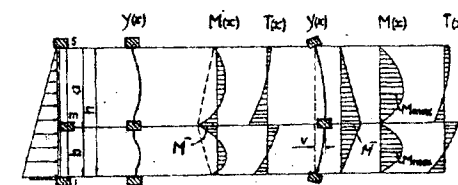


a

construcție de
deformare/calcul ale
**elementelor cilindrice
prefabricate** asamblate
într-un rezervor cilindric
cu 2 - 3 inele din BP
dispuse pe înălțimea
structurii: a - în plan
orizontal; 2 - cu 2 inele
în plan vertical; c - cu 3
inele de asamblare.



b



c

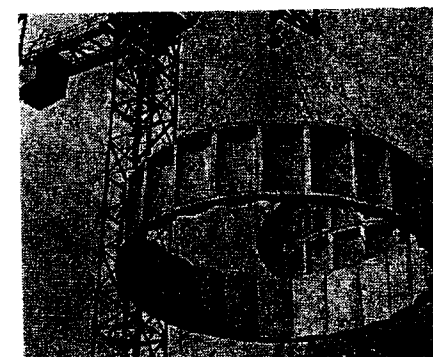
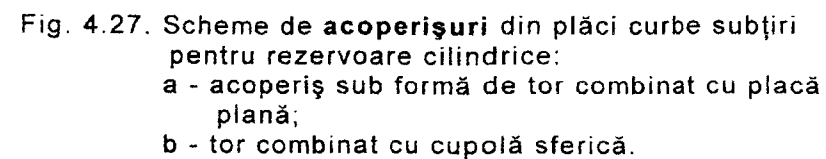
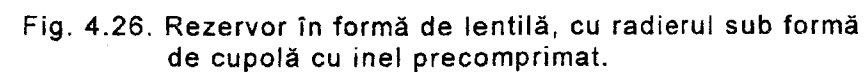
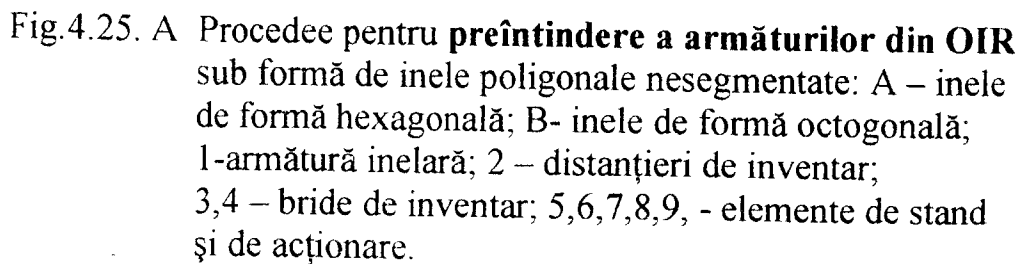


Fig. 4.25. Rezervor de mică capacitate realizabil din virole "cilindrice", cu secțiune transversală conformată pentru preluarea presiunii hidrostatice, asamblate pe verticală prin precomprimare generală.



pentru realizarea unor rezervoare de mică capacitate, în urma operației de ansamblare prin precomprimare verticală a două – trei subansambluri identice.

Realizarea unor virole (poligonale, precomprimate pe orizontală cu **armătură inelară preîntinsă, deflecată**, după procedeele originale (fig.4.25.A) prezentate în /8/ și ansamblarea acestora prin precomprimare generală pe verticală, cu armături postîntinse, permit obținerea unor rezervoare cu capacități limitate, dar de largă utilizare.

În categoria rezervoarelor de capacitate limitată poate fi inclus și sistemul din fig. 4.26, de formă “lenticulară” în secțiune verticală; prezintă particularitatea că atât radierul cât acoperișul, sub formă de cupole cvasiidentice, descarcă încărcările proprii într-un inel comun (cu dezvoltare verticală) de beton precomprimat; ansamblul prezentat conferă o stabilitate superioară la acțiuni exterioare aleatorii.

În fig. 4.27 se evidențiază tipuri de acoperișuri pentru rezervoare cilindrice sub formă de plăci curbe subțiri continue fie pe pereți cilindrici concentrici, fie pe peretele cilindric exterior și un șir concentric de stâlpi interiori.

În cazul rezervoarelor cu diametre mari și al prefabricării acoperișului se adoptă soluția din fig. 4.28; elementele trapezoidale de placă plană sunt rezemate pe grinzi inelare dispuse pe șiruri concentrice de stâlpi interiori și peretele cilindric perimetral.

În fig. 4.29 se relevă imaginea de ansamblu a unei cupole sferice, realizată din elemente prefabricate curbe din BA, ce acoperă un rezervor cilindric.

Sistemul constructiv din fig. 4.30 reprezintă o sinteză a soluțiilor menționate, ce implică îngroparea parțială a rezervorului cilindric, dezvoltarea concentrică a unui perete exterior (cu inel din BP la partea superioară), ca suport pentru ancorarea cablurilor de oțel ale unui acoperiș circular, de mare deschidere, suspendat de un stâlp central.

Cele mai răspândite sisteme constructive pentru rezervoare cu capacități medii de înmagazinare sunt cele clasice cu nervuri exterioare, pe care se blochează fasciculele postîntinse segmentate, plasate în canalele căptușite cu teci

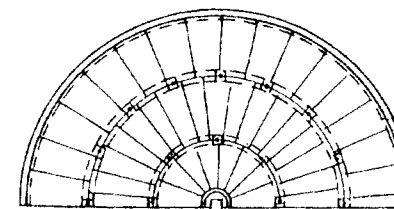


Fig. 4.28.
Acoperiș alcătuit din
elemente
trapezoidale de trei
tipuri dispuse pe
grinzi inelare
rezemate pe stâlpi.

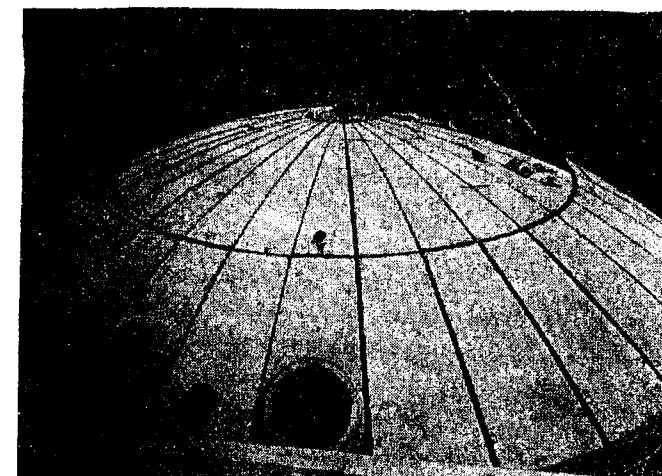


Fig. 4.29. Rezeror cu acoperiș în formă de cupolă sferică
realizată cu elemente prefabricate.

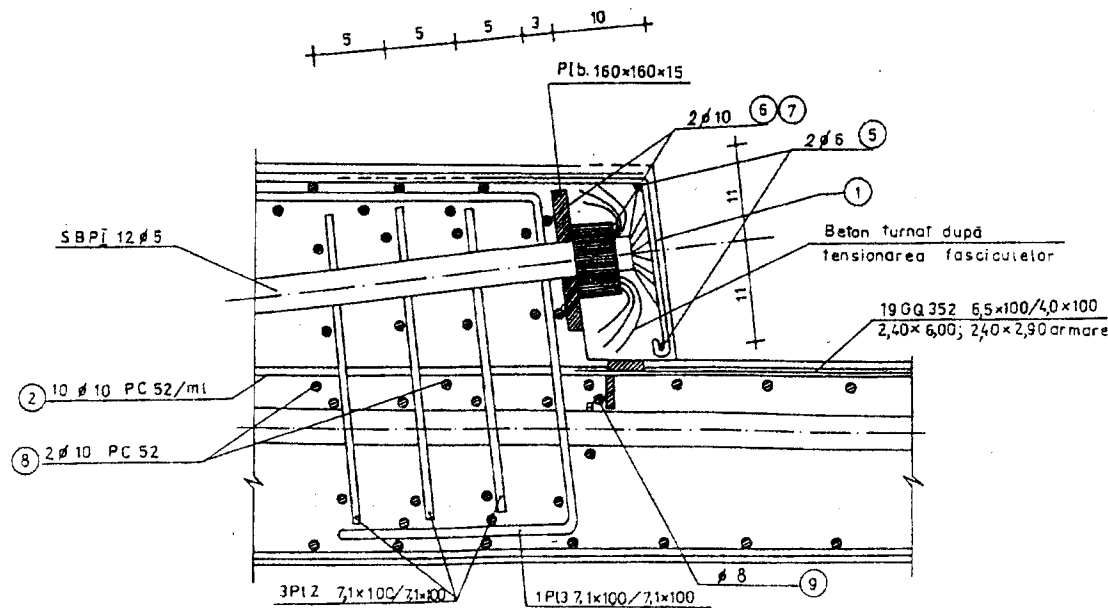
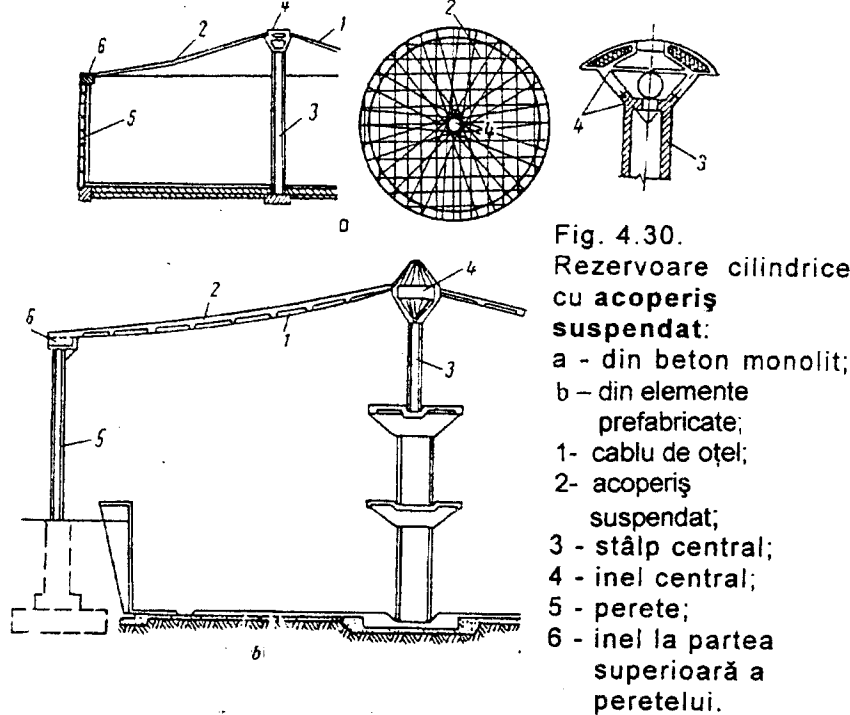


Fig. 4.31. Detaliu zonă de ancorare pentru un fascicul curbiliniu postîntins, alcătuit din sârme paralele SBPI I, cu mijloace mecanice de tip inel + con.

PVC; detalii privind modul de protecție a ancorajelor mecanice pe nervuri, respectiv de armare a acestor zone, cu evidențierea traseelor armăturilor postîntinse sub formă de fascicule, sunt date în fig. 4.31 și 4.32.

Recipientele pentru gaze naturale lichefiate (fig. 4.33) în afara elementelor comune de concepție și calcul, implică exigențe suplimentare privind regimul termic al ansamblului; radierul, de tip rigid, este rezemat pe piloți din BA/BP; pentru limitarea degradărilor care ar putea apare în cazul unei acțiuni seismice severe se poate prevedea o rezemare elastică (neopren) a peretelui cilindric din BP pe piloții / coloanele de BA din șirul circular marginal (fig. 4.34).

În fig. 4.35 se detaliază armarea unui rezervor cilindric suprateran din BA pentru înmagazinarea păcurii, atât în ansamblu cât și pentru zonele de legătură cupolă - perete, perete - radier, respectiv cele adiacente golurilor tehnologice mari; în fig. 4.36 se insistă asupra modului de armare pentru componentele structurale esențiale ale unui rezervor subteran cu planșeu și radier tip ciupercă.

Folosirea elementelor prefabricate de perete cilindric, sub formă de chesoane de perete cu dublă curbura, la realizarea unor decantoare este evidențiată în figura 4.37. Aceste construcții speciale au diametre de 45 m și sunt alcătuite din câte 48 elemente prefabricate, asamblate prin precomprimare cu două inele, inferior și superior, reprezentând reazeme pentru chesoanele folosite.

În vederea unei prefabricări raționale, peretele exterior al decantorului Sedclar a fost conceput cu două pante și fragmentat sub forma unor chesoane curbe (fig.4.38), cilindrice pentru partea verticală și conoidale pentru zona de perete înclinat.

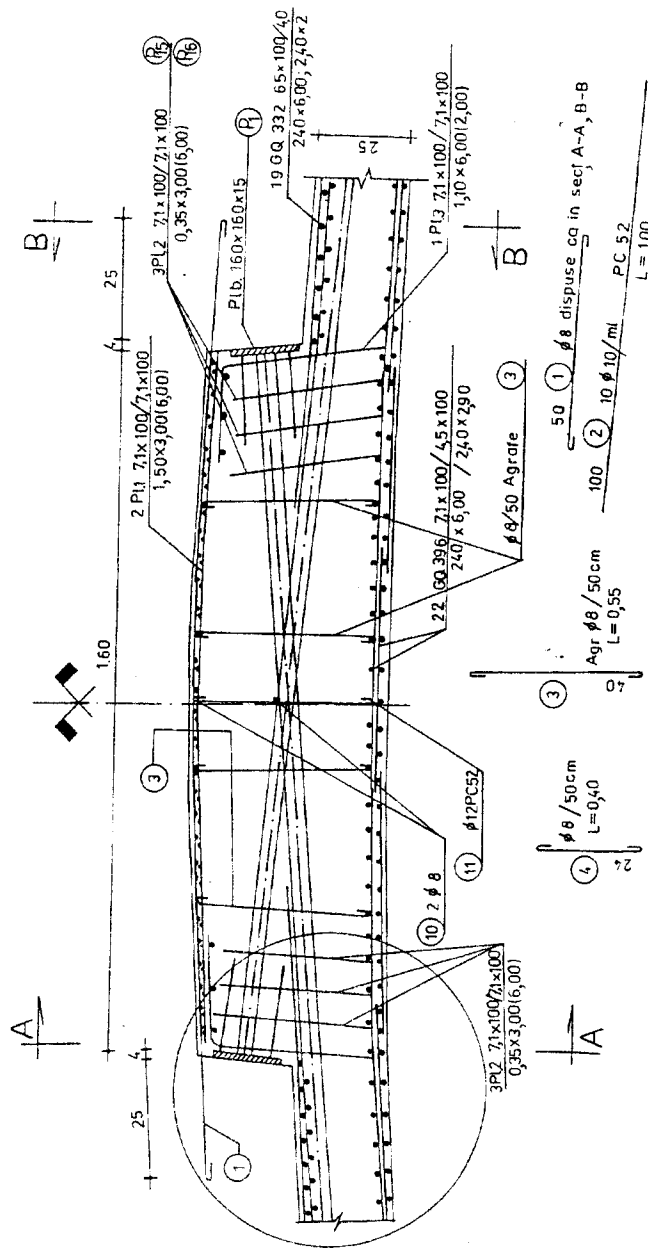


Fig. 4.32. Detaliu armare nervură din beton armat pentru ancorarea fasciculelor postîntinse segmentate.

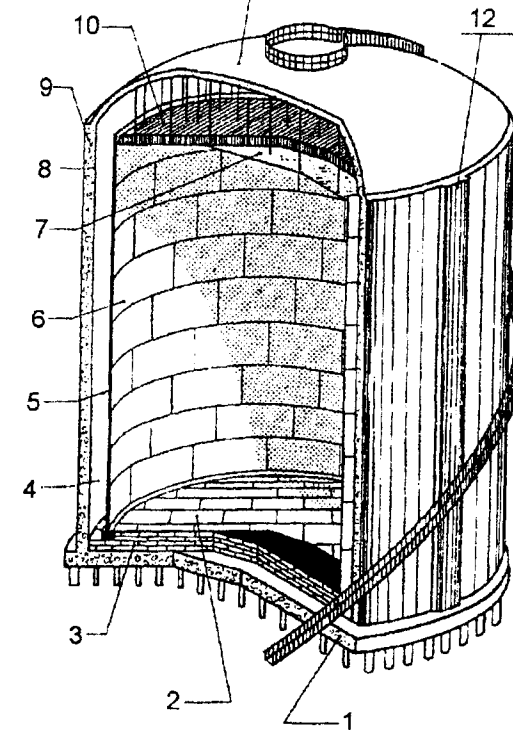


Fig. 4.33. Reprezentare izometrică a unui rezervor pentru gaz natural lichefiat, cu capacitatea de 80.000 m³, executat la Fos - sur - Mer, Franța:
 1 - radier de beton armat pe piloți;
 2 - fund metalic interior;
 3 - izolația fundului;
 4 - cămașă izolatoare (perlit expandat);
 5 - manta elastică (vată de sticlă);
 6 - cămașă interioară de oțel (criogenică);
 7 - tavan suspendat (aluminu);
 8 - membrană de etanșeizare;
 9 - perete exterior din beton precomprimat;
 10 - izolația acoperișului (vată de sticlă);
 11 - acoperiș exterior din beton;
 12 - nervură de ancorare a armăturilor postîntinse.

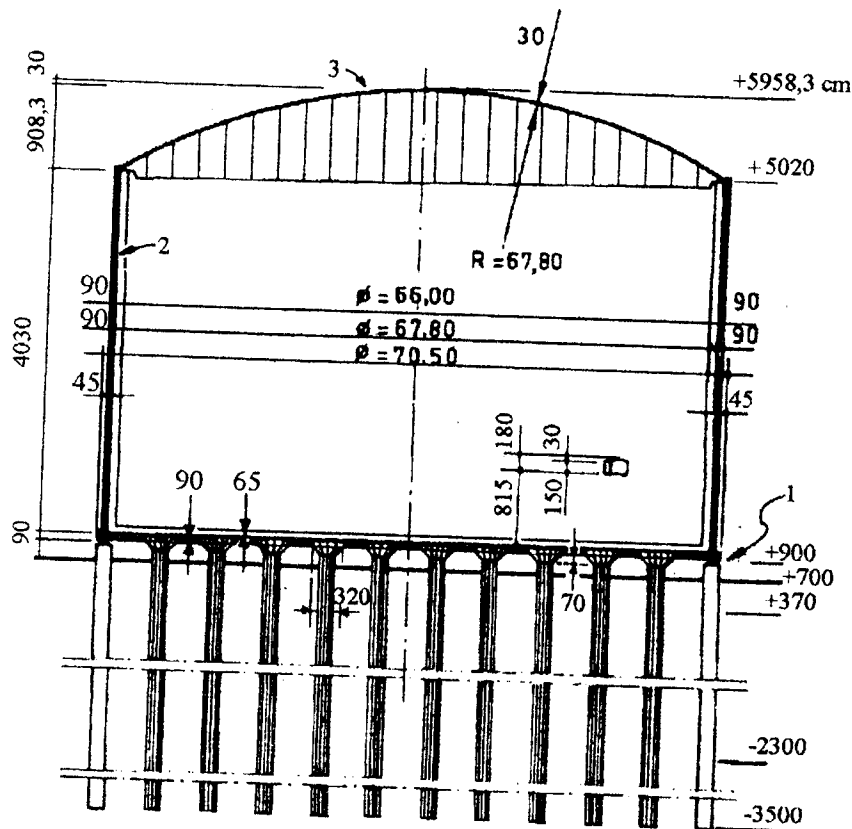


Fig. 4.34. Secțiune verticală printr-un rezervor de gaz natural lichefiat, cu capacitatea de 120.000 m³, executat la Montoir - en - Bretagne:
 1 - neopren;
 2 - perete cilindric din beton precomprimat;
 3 - acoperiș sub formă de calotă sferică din beton.

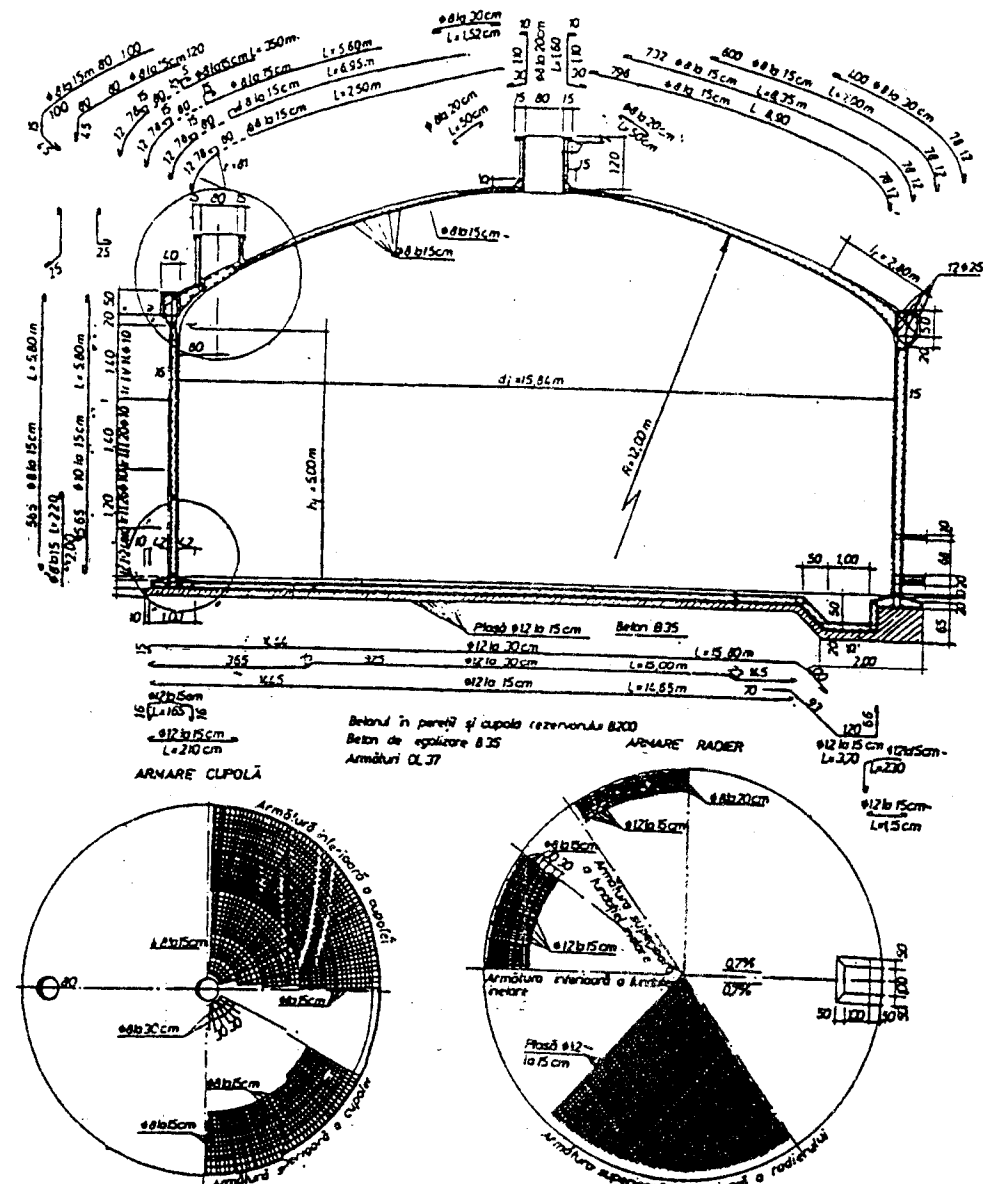


Fig. 4.35.a Armarea unui rezervor cilindric, circular, din BA pentru păcură.

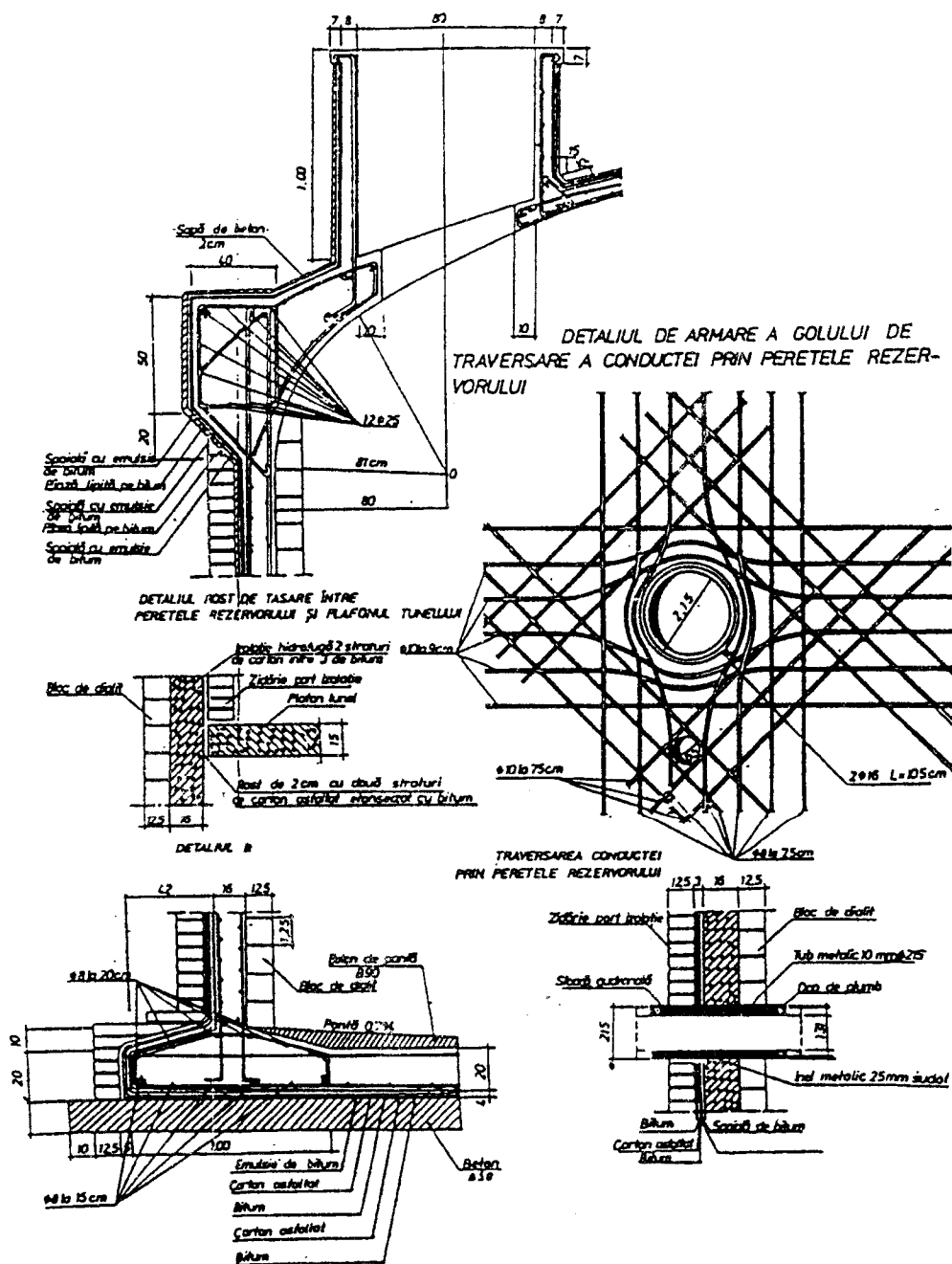


Fig. 4.35.b Armarea unui rezervor cilindric, circular, din BA pentru păcură.

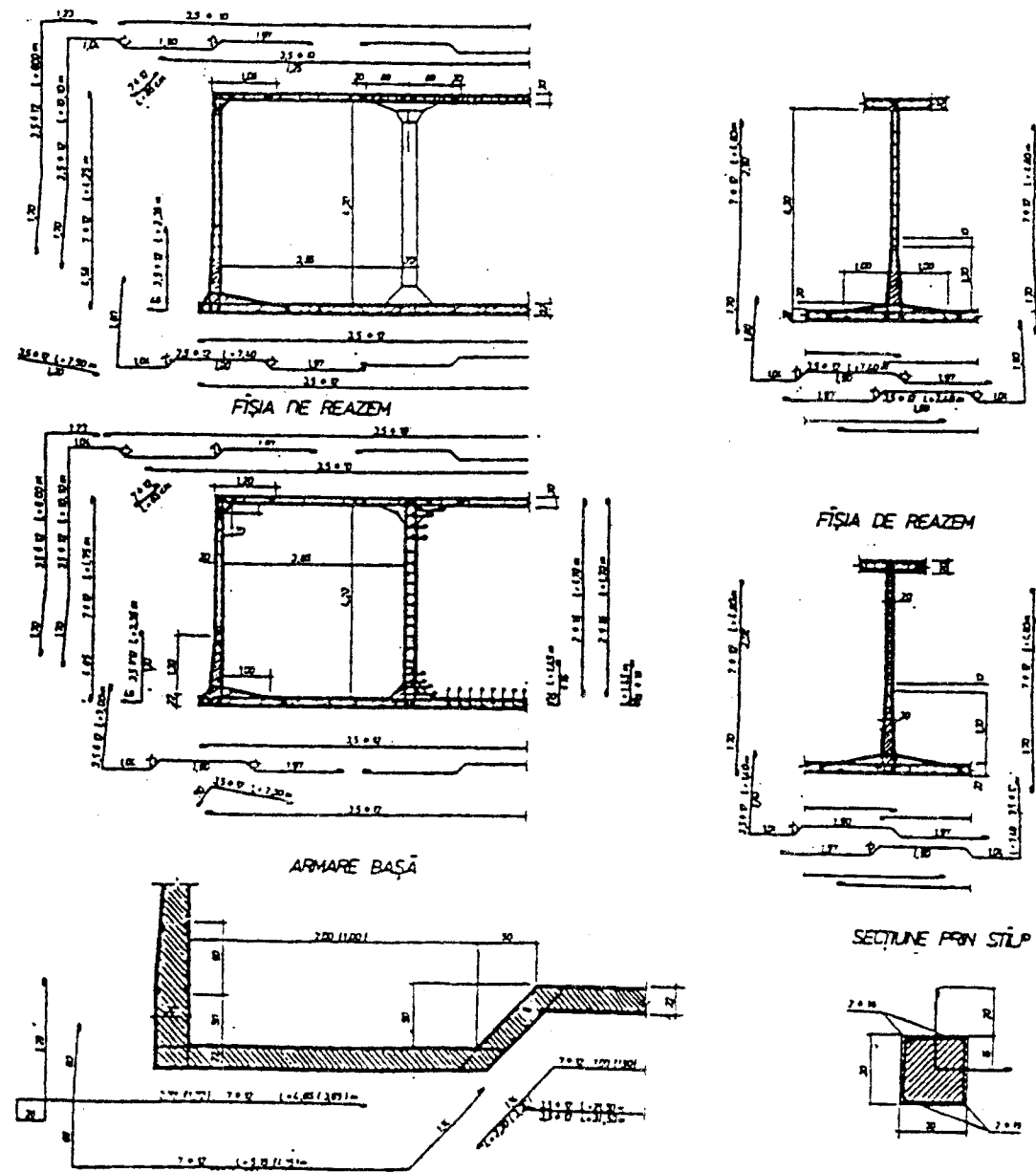
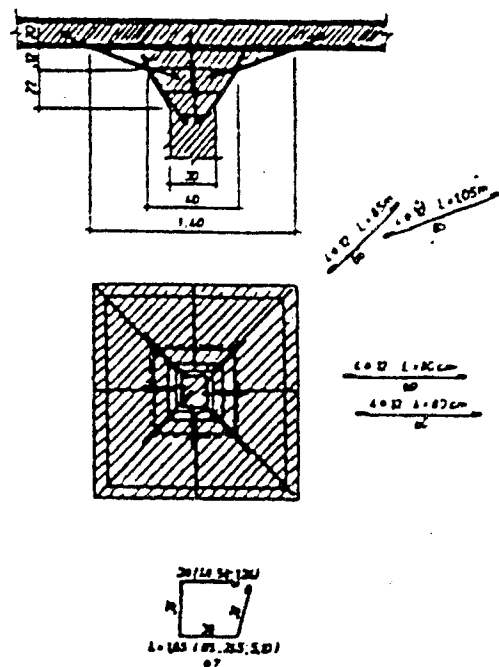
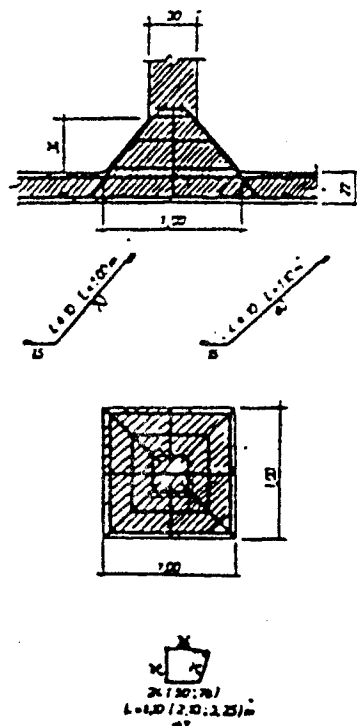


Fig. 4.36.a Armarea unui rezervor subteran ($2 \times 3000 \text{ m}^3$) cu planșeu / radier tip ciupercă.

ARMARE CUPERCĂ PLANȘEU



ARMARE CUPERCĂ RADIER



ARMAREA COLȚURILOR

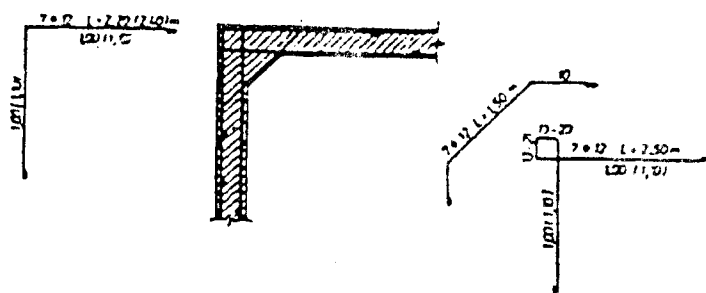


Fig. 4.36.b Armarea unui rezervor subteran ($2 \times 3000 \text{ m}^3$) cu planșeu / radier tip ciupercă.

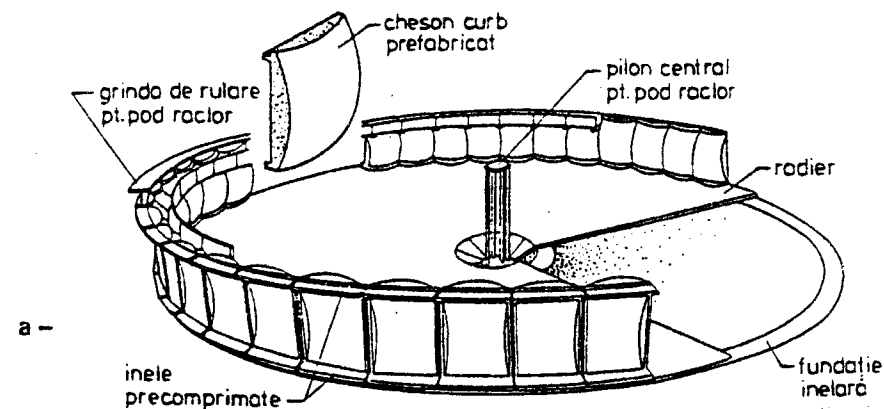
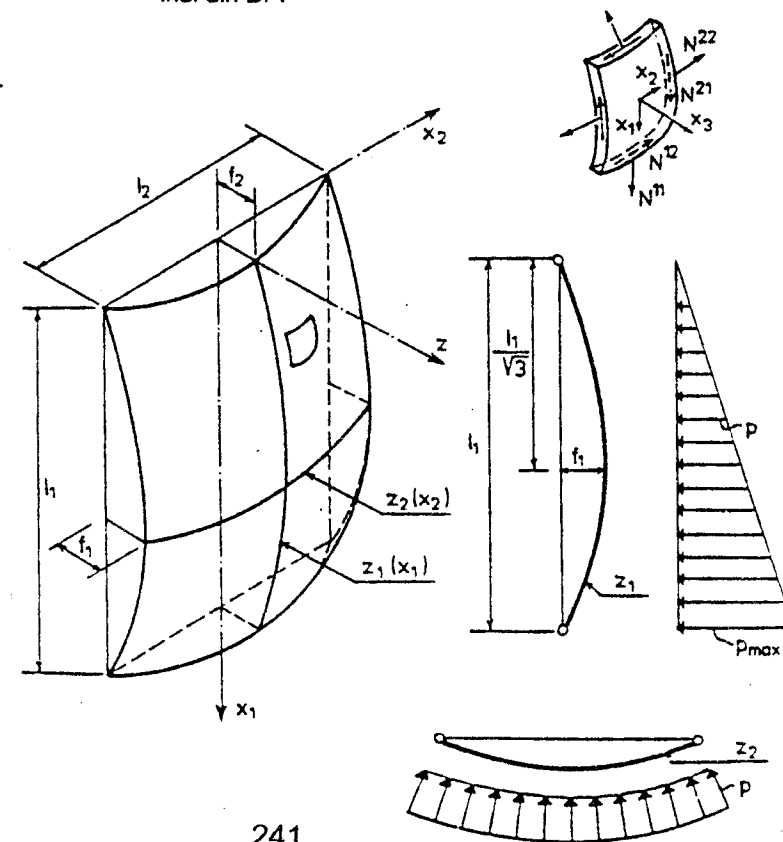


Fig. 4.37. Decantoare omogenizatoare la Stația de epurare biologică a Combinatului Petrochimic Midia – Năvodari:
a – alcătuire generală; b – model de calcul pentru chesonul curb prefabricat; c – secțiune curentă inel din BP.

b –



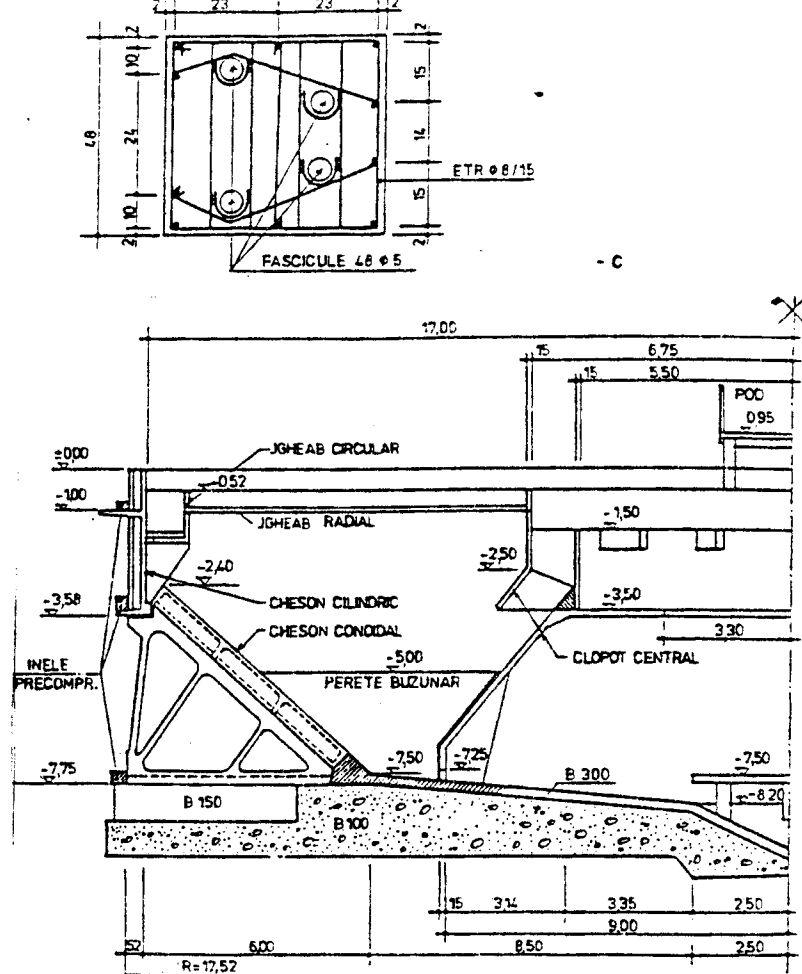
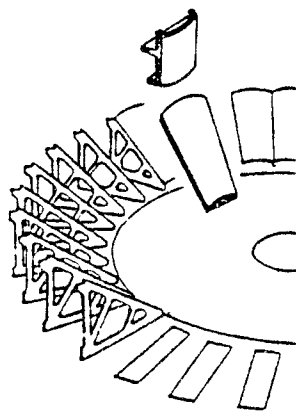


Fig. 4.38.
Decantoare Sediclar pentru
epurarea apelor naturale
folosite ca apă industrială
(cu pereți laterali prefabricați
în două pante și corp
central).



Capitolul 5

TEHNOLOGII SPECIALE LA EXECUȚIA REZERVOARELOR

Realizarea rezervoarelor cilindrice din BP implică tehnologii specifice, atât pentru realizarea peretelui cilindric din BA cât și pentru execuția precomprimării acestuia.

În vederea reducerii până la anulare a eforturilor inelare de întindere produse de presiunea lichidului înmagazinat, în funcție de particularitățile constructive (monolit; prefabricat), se poate adopta fie **soluția precomprimării discrete** (cu inele segmentate de armătură pretensionată, dispuse la distanțe semnificative pe verticală, ancorate în nervuri verticale din BA), fie **soluția precomprimării continue** (prin înfășurarea sub tensiune mecanică a unui fir din oțel de înaltă rezistență, cu pas mic, utilizând un număr minim de blocaje mecanice).

Fată de cazul pereților cilindrici fără tensiuni inițiale artificiale, la pereții cilindrici precomprimați apar și alte aspecte legate de:

- 1) distribuția optimă a inelelor/înfășurării de armătură pretensionată pe înălțimea peretelui, alegând corespunzător funcția de precomprimare;
- 2) controlul stării de eforturi din acțiunea precomprimării;
- 3) cunoașterea eforturilor secundare temporare (la execuție) sau permanente, care apar la înfășurarea rezervorului, respectiv la pretensionarea fasciculelor izolate.

Realizarea unui **efort inelar de compresiune** în pereții cilindrici cu diametre mari, prin precomprimarea acestora, utilizând

fascicule postîntinse segmentate (fig. 5.1), este posibilă cu ajutorul preselor hidraulice cu dublu efect (fig. 5.14), respectiv a celor cu gol central (fig. 5.15).

Pentru prinderea sârmelor din oțel de înaltă rezistență (OIR) în presele hidraulice, în faza de execuție a pretensionării, se prevăd lungimi suplimentare " l_1 ", care sporesc lungimea " l_p " a acestora, cuprinse între fețele exterioare ale plăcilor de repartiție, plasate pe fețele nervurilor pe care se realizează blocarea fasciculelor segmentate; detalii privind dispoziția nervurilor unui (exemplu) rezervor cilindric cu raza medie $R_1 = 12,425$ m și grosimea $\delta = 25$ cm, schema de montaj a elementelor prefabricate de acoperire (precomprimare cu armătură preîntinsă rectilinie), respectiv modul de dispunere a inelelor formate din fascicule postîntinse segmentate, sunt date în **ANEXA 5.1** (planșele 1, 2 și 3).

În cazul folosirii fasciculelor din sârme paralele, introduse în teci PVC înglobate în peretele rezervorului, grosimea peretelui rezultă relativ mare, datorită numărului important de ancoraje mecanice (tip inel – con) sau suprapunerilor fasciculelor în dreptul nervurilor.

În peretele cilindric se practică, în afara rosturilor de dilatație și de tasare, **rosturi de turnare** (secțiuni în care se întrerupe turnarea betonului la rezervoarele monolite sau în zonele în care nu este asigurată condiția de etanșeitate), respectiv **rosturi de contracție** (pentru a permite deformația liberă a betonului din efectul contracției sau al variației de temperatură în timpul execuției).

Combinarea rosturilor de turnare cu cele de contracție este rațională la execuția rezervoarelor mari; acestea se dispun pe verticală și se execută fără dificultăți, peretele cilindric turnându-se pe tronsoane verticale.

Rosturile vor avea lățimi de 15 ... 20 cm, se betonează ulterior și se închid după o lună de la turnarea betonului în perete, la temperaturi mai scăzute (preferabil, toamna), înainte de umplerea rezervorului cu apă.

Rosturile de dilatație și de tasare se execută astfel încât să permită deplasarea relativă a suprafețelor ce vin în contact, în timpul exploatării rezervorului, fără să permită trecerea apei; aceste rosturi sunt costisitoare și greu de întreținut și se adoptă mai ales la radier

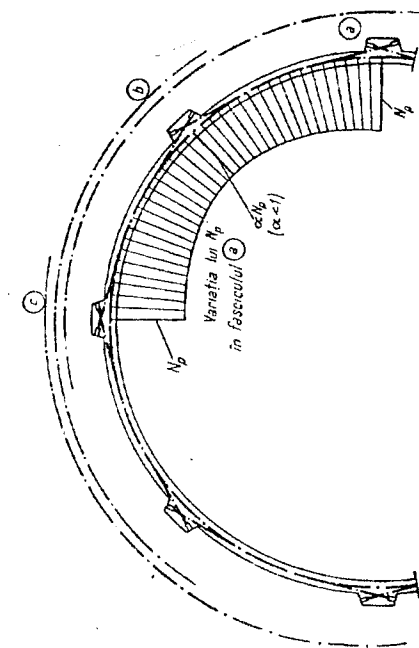


Fig. 5.1. Dispunerea în plan orizontal a fasciculelor pretensionate segmentate ce alcătuiesc un inel "închis" pentru precomprimarea rezervoarelor cilindrice cu număr mare de nervuri verticale.

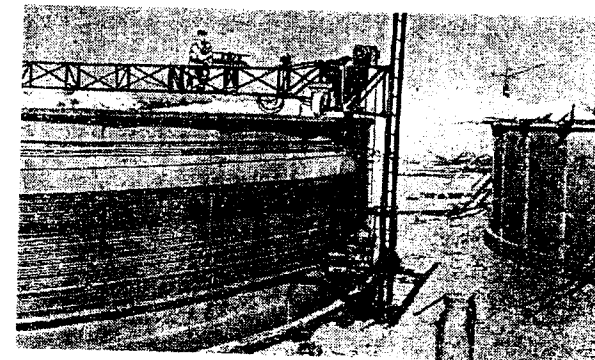


Fig. 5.3. Aspect de la precomprimarea prin înfășurare a unui rezervor din beton cu instalația ANM 5 (Rusia).

(detalii în fig. 5.16); aceste rosturi se realizează cu ajutorul unor diafragme din tablă de cupru sau zinc și bitum cauciucat, respectiv cu diafragme de cauciuc, membrane din material plastic, benzi de cauciuc sau frânghie gudronată și mastic de bitum.

În funcție de **tipul legăturii perete – radier**, ales în faza de concepție/proiectare a rezervoarelor, se pot folosi detalii similare celor prezentate în fig. 5.17.

Legăturile perete – radier pot fi alese în concordanță cu **faza de lucru** a rezervorului, de tipurile: **a)** liber sau simplu rezemat la execuția precomprimării peretelui cilindric; **b)** articulat sau încastrat la acțiunile exterioare care intervin după precomprimarea peretelui și monolitizarea rostului perimetral.

Precomprimarea peretelui cilindric poate fi efectuată cu ajutorul armăturilor din OIR sub formă de fascicule sau bare inelare, izolate, dispuse în canale sau pe suprafața exterioară a acestuia.

Barele/fasciculele sunt segmentate pentru a reduce pierderile de tensiuni prin frecare; se recomandă ca lungimea **armăturii pretensionate segmentate** să nu depășească $\frac{1}{4}$ din circumferința peretelui cilindric; se prevăd 6 sau 8 nervuri verticale, iar capetele armăturii pretensionate se ancorează decalat de la un rând la altul, pentru a obține uniformizarea efectelor precomprimării realizate cu fascicule segmentate (fig. 5.1 și planșa 3 din **ANEXA 5.1**).

În scopul obținerii unei precomprimări cât mai uniforme și reducerii numărului de ancoraje mecanice, mai ales în cazul pereților cilindrici prefabricați, se adoptă soluția precomprimării acestora prin înfășurarea deasă, sub tensiune mecanică, a unei armături continue, folosind instalații adecvate de tip Sainrapt și Brice (fig. 5.2), ANM 5 (fig. 5.3; Rusia) sau INCERC – BAC (fig. 5.4; România); aspecte concrete de la precomprimarea pereților cilindrici prin înfășurare și realizarea protecției înfășurării cu microbeton, aplicat prin torcretare, sunt evidențiate în fig. 5.5.

La rezervoarele de mari dimensiuni se folosesc înfășurări de sârmă din OIR cu diametre de 2 ... 5 mm; operația de pretensionare a înfășurării se efectuează cu mașini BBRV (Elveția), ANM 5 ... ANM 10 (Rusia), Preload (S.U.A.), Vondrašek (Cehia), care

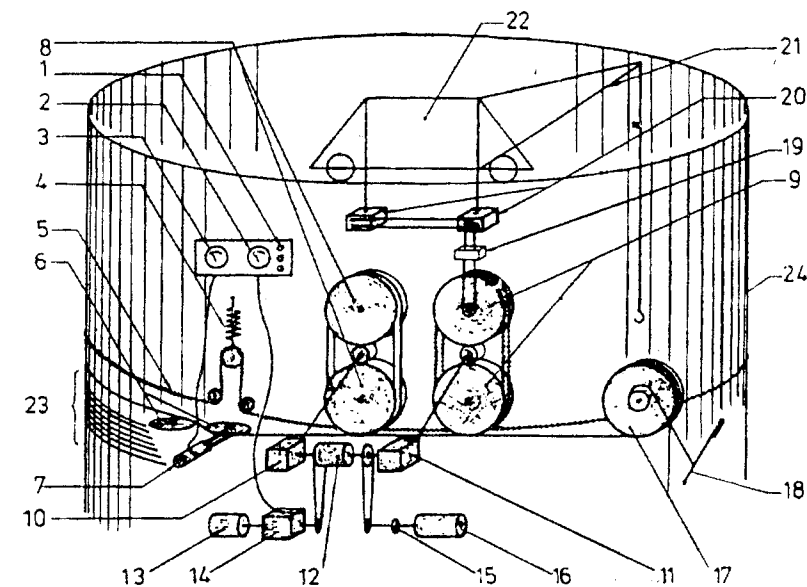


Fig. 5.2. Sistemul Sainrapt și Brice de pretensionare a sârmelor de înaltă rezistență prin înfășurarea recipienților circulari (**precomprimare continuă**) din beton: 1 - pupitrul de comandă; 2 - reostat de tensiune; 3 - manometrul presei; 4 - arcul de întindere a cablului de tracțiune; 5 - cablu de tracțiune; 6 - role de deviere; 7 - presă; 8 - scripete de întindere a sârmei; 9 - scripete de întindere a cablului de tracțiune; 10 - reductor pentru sârma întinsă; 11 - reductor pentru cablul de tracțiune; 12 - diferențial; 13 - motor diferențial; 14 - elcotron; 15 - cuplaj hidraulic; 16 - motorul principal de tracțiune; 17 - bobina sârmei; 18 - frâna bobinei; 19 - cap de cal; 20 - reductori de suspensie; 21 - macara pentru ridicarea bobinei de sârmă; 22 - cărucior mobil; 23 - sârme înfășurate sub tensiune (zonă fretată); 24 - peretele rezervorului.

se deosebesc prin modul de tensionare a armăturii continue și prin sistemul de transmitere a mișcării.

Instalația românească INCERC – BAC cuprinde două cărucioare; unul se deplasează pe marginea superioară a peretelui, iar celălalt este suspendat și efectuează înfășurarea sub tensiune mecanică a sârmei.

Înfășurarea se execută de sus în jos cu o viteză de 20, 40 sau 60 m/minut. Cu acest procedeu pot fi precomprimate rezervoare cu diametre variind între 10 m și 45 m și cu înălțimea între 3 m și 8,5 m.

În practică, sârma tensionată se blochează pe peretele rezervorului pentru a evita desfășurarea completă în cazul ruperii sârmei la tensionare sau la terminarea unui colac.

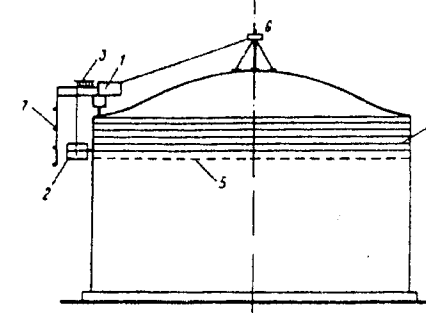
Înfășurarea se execută pe baza unui **program de tensionare** care fixează distanța (pasul) dintre spire și modul de înfășurare (într-o treaptă sau în mai multe trepte). Procedul de înfășurare în mai multe trepte permite evitarea apariției unor momente încovoietoare și forțe tăietoare semnificative (care ar putea produce forfecarea orizontală a peretelui), în zona de tranziție între partea înfășurată și cea neînfășurată.

Protecția sârmelor din OIR se realizează cu ajutorul unui strat de microbeton torcretat cu grosimea de 25 ... 30 mm; în cazul adoptării mai multor straturi de armături pretensionate, se aplică peste fiecare rând de armătură câte un strat de mortar torcretat de 10 mm grosime.

În cazul existenței unor goluri mici (cu diametre de 10 ... 20 cm) în peretele cilindric, înfășurarea se continuă peste ele, iar ulterior sârmele sunt deviate pentru a ocoli aceste goluri; golurile mari determină întreruperea înfășurării.

Precomprimarea prin înfășurare este avantajoasă deoarece permite simplificarea operațiilor de armare și betonare a peretelui cilindric, utilizarea mai rațională a armăturii active din OIR (prin reducerea maximă a frecărilor) și diminuarea consumului de manoperă.

Precomprimarea cu **fascicule segmentate dispuse pe fața exterioară a peretelui cilindric**, conform precedului **Mo-Ta-La** (fig. 5.6), implică ancorarea armăturilor active într-o singură bară



- Principiul precomprimării continue prin înfășurare a recipientelor cilindrici din beton cu instalația INCERC - BAC (România):
- 1 - cărucior superior;
 - 2 - cărucior suspendat;
 - 3 - colac de sârmă din oțel de înaltă rezistență (OIR);
 - 4 - sârmă pretensionată prin procedeu mecanic;
 - 5 - lanț Gall;
 - 6 - reazem central;
 - 7 - scară.

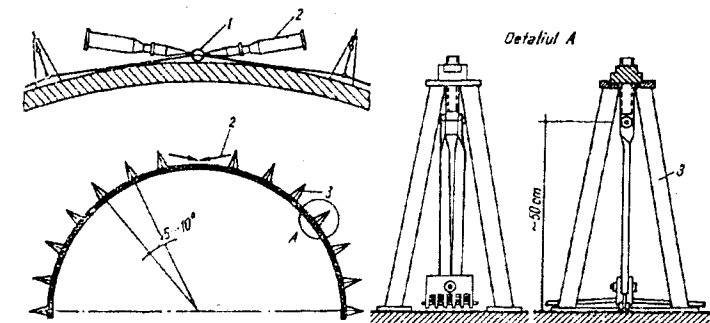
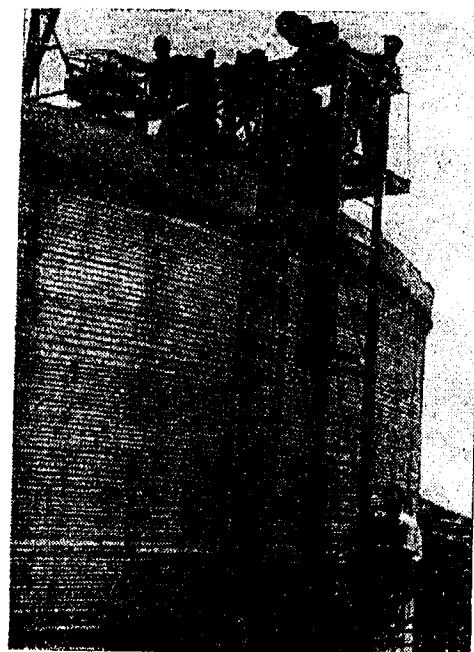


Fig. 5.6. Procedul de precomprimare Mo - Ta - La:

- 1 - bară verticală de ancoraj;
- 2 - presă;
- 3 - pendul pentru eliminarea/diminuarea frecării în lungul armăturii pretensionate.



a



b

Fig. 5.5. Procedul de precomprimare a recipientelor cilindrice prin **înfășurare sub tensiune mecanică**:

- a - faza de execuție a pretensionării sârmelor din OIR;
- b - realizarea protecției sârmelor pretensionate cu microbeton aplicat prin **torcretare**.

metalică verticală cu diametrul de 70 mm; în timpul operației de pretensionare, fasciculul este susținut de penduli dispuși din loc în loc; după pretensionare, efortul din fascicul este transmis treptat asupra peretelui, de la pendul la pendul, menținând presele sub presiune constantă pentru a compensa diferențele de alungire.

În cazul folosirii **inelenor nesegmentate sub formă de bare**, pretensionarea acestora, respectiv precomprimarea peretelui cilindric se realizează prin **procedeul electrotermic** /9/, /10/; inelele de armătură tip PC 90, PC 100, sunt încălzite pe cale electrică (efect Joule – Lenz) la **temperatura de control** care permite atingerea alungirii proiectate.

În stare încălzită, armătura inelară este îmbrăcată pe peretele cilindric (cu dimensiuni reduse); transferul efortului de precomprimare are loc lent, odată cu răcirea inelelor de armătură netedă sau profilată.

Prin răcire, armătura are tendința de a-și reveni, însă peretele cilindric împiedică revenirea liberă a deformației, generând un efort de întindere în armătura inelară, corespunzător deformației împiedicate, respectiv eforturi de compresiune în beton.

Dificultățile care apar în procedeul electrotermic de tensionare a inelelor de armătură relativ rigidă constau în existența pierderilor de tensiuni ce apar în timpul mulării acestora pe suprafața peretelui de beton.

În vederea reducerii pierderilor de tensiuni au fost concepute 3 sisteme de lucru (fig. 5.7) ce implică:

- pretensionarea unor inele circulare folosite pentru forme cilindrice la care armătura din OIR este mulată manual pe suprafața de beton, după încălzire, cu ajutorul a 2 piulițe care se sprijină pe blocajul de beton sau pe pereții unei nervuri realizate în acest scop (fig. 5.7.a);

- pretensionarea unor inele circulare dispuse pe forme ușor tronconice, prin batere în stare încălzită (fig. 5.7.b);

- pretensionarea unor inele circulare care sunt legate cu bare verticale într-o rețea; după încălzire, inelele sunt îmbrăcate forțat cu ajutorul unor prese fixate pe corpul rezervorului.

Barele pretensionate se protejează prin acoperire cu un mortar de ciment (fig. 5.7.c).

Sistemele menționate anterior prezintă avantajul folosirii unor inele din OIR nesegmentate, la care frecările sunt eliminate prin deformarea liberă a acestora prin încălzire; în acest mod, în lungul inelelor din OIR eforturile sunt uniforme.

Precomprimarea rezervoarelor se realizează și prin întinderea manuală a unor bare din OIR cu diametre mari, sub formă de segmente circulare filetate la capete, cuplate între ele cu mufe (fig. 5.8).

În dreptul mufelor se prevăd, în pereții rezervorului, nișe speciale, cu adâncimea suficientă pentru rotirea mufei filetate.

Întinderea barelor se realizează cu ajutorul unor chei dinamometrice cu clicheți.

Precomprimarea pereților cilindrici se poate realiza și prin "frângerea" traseului armăturilor continue, după detaliile prezentate în fig. 5.9.

În unele cazuri s-a folosit și **procedeul de precomprimare prin extensia diametrului rezervorului**, bazat pe proprietatea betoanelor/mortarelor cu cimenturi expansive de a-și mări volumul după întărire; acest sistem este aplicabil la rezervoarele alcătuite din elemente cilindrice prefabricate, cu rosturi verticale între ele /9/.

În /18/ se detaliază **procedeul de precomprimare radială prin acționări succesive și autoechilibrare**, conceput în scopul obținerii unei distribuții uniforme a efectelor precomprimării pe circumferința rezervoarelor prefabricate, respectiv în lungul toroanelor postîntinse.

Acest procedeu (fig. 5.10) constă în suspendarea toronului de o serie de dispozitive pendulare și deplasarea radială a acestuia prin acționarea unor tije de tragere cu ajutorul unui grup de prese hidraulice, orizontale, situate pe același diametru, care se deplasează succesiv la toate dispozitivele pendulare.

După execuția pretensionării, toronul se betonează în poziție deformată, iar după ce betonul de monolitizare/protecție a atins rezistența necesară se efectuează operația de transfer prin acționarea piuliței de blocare.

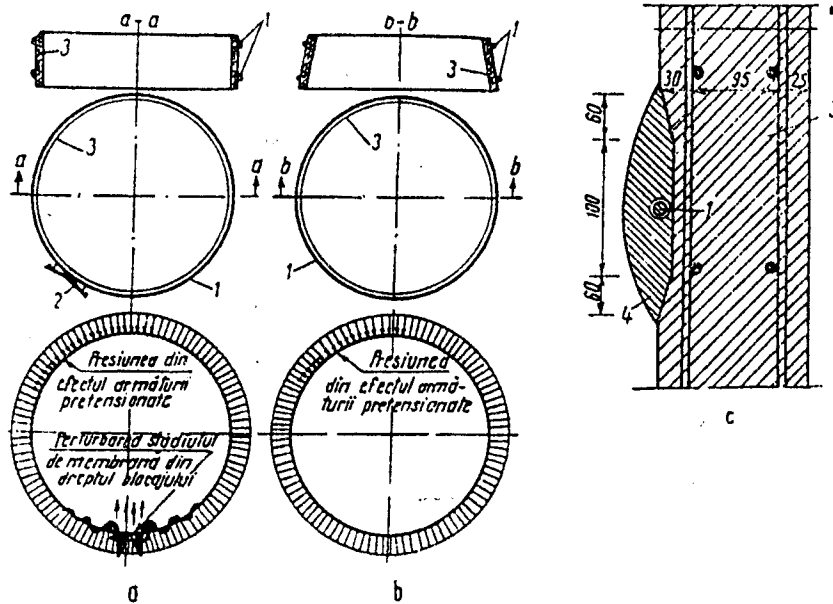


Fig. 5.7. Pretensionarea armăturilor din OIR prin **procedeul electrotermic**:

- a - cu inel segmentat, închis într-un blocaj special;
- b - cu inel închis;
- c - protecția armăturii pretensionate;
- 1 - armătură inelară din OIR;
- 2 - blocaj;
- 3 - perete cilindric/tronconic;
- 4 - mortar/microbeton.

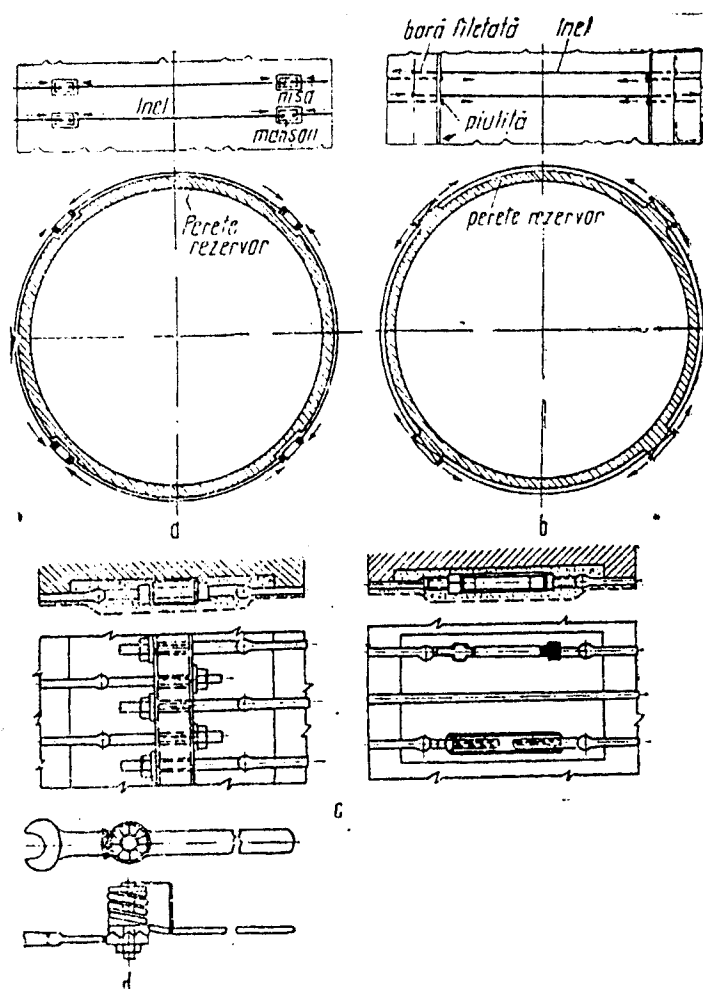
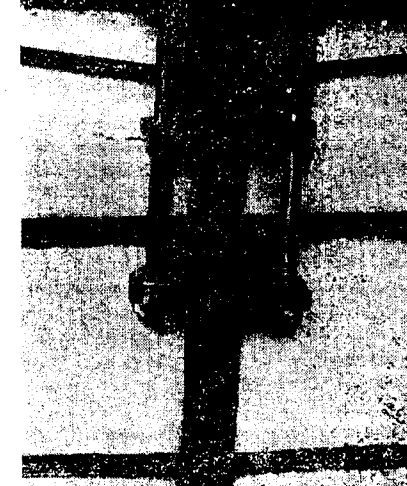
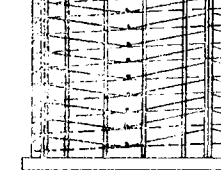


Fig. 5.8. Precomprimarea rezervoarelor cu bare pretensionate mecanic cu chei dinamometrice:
a - blocarea armăturii în nișe;
b - blocarea în nervuri (pilaștri);
c - detaliu de blocare;
d - chei dinamometrice.

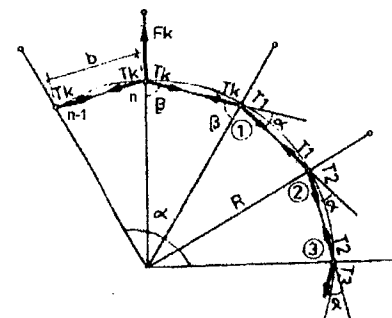


a

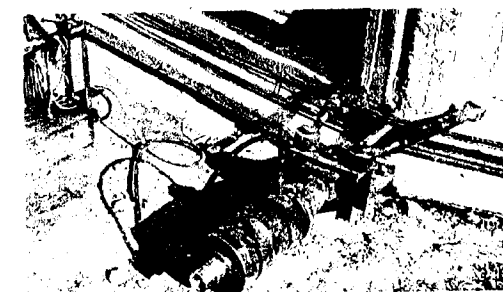


b

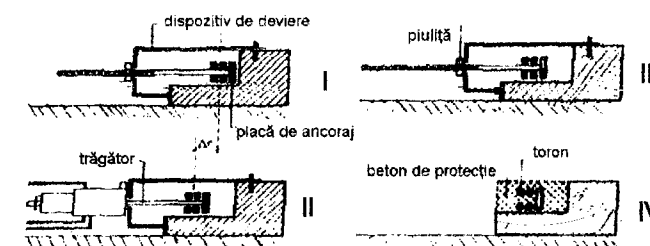
Fig. 5.9. Pretensionarea armăturii prin frângerea traseului (cu constrângeri):
a - dispozitiv de deviere;
b - dispoziția armăturilor din OIR după frângerea traseului.



a



b



c

Fig. 5.10. Procedu de pretensionare radială prin operații succesive: a - schema de lucru; b - instalație; c - fazele de realizare a pretensionării toroanelor.

Datorită sistemului pendular cu ajutorul căruia a fost suspendat toronul, se obține, în final, o bună echilibrare a forței de tensionare în zonele ramurilor toronului.

În figurile 5.11 și 5.12 sunt evidențiate aspecte specifice de la montajul elementelor prefabricate ce compun un perete cilindric, respectiv schemele de dispunere a fasciculelor segmentate pe înălțimea pereților cilindrici ai rezervoarelor cu capacități de $10\ 000\text{ m}^3 \dots 20\ 000\text{ m}^3$, executate în soluție monolită.

În **cazul precomprimării verticale** a pereților cilindrici apare problema ancorării fasciculelor rectilinii în radier (capăt fix); în fig. 5.13 se prezintă detalii pentru ancorarea armăturilor active verticale, realizate din sârme paralele sau din bare groase.

Tensionarea fasciculelor din sârme paralele SBP I se execută cu ajutorul preselor hidraulice cu dublu efect (pentru forțe de control $N_k \leq 60\text{ tf}$) sau cu gol central, tip INCERC 120 ($N_k \leq 120\text{ tf}$).

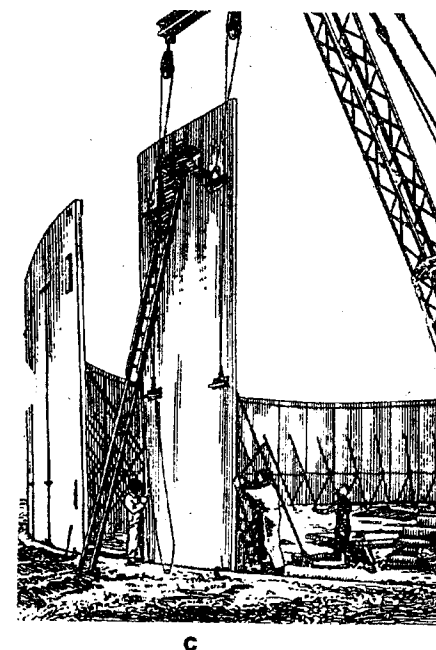
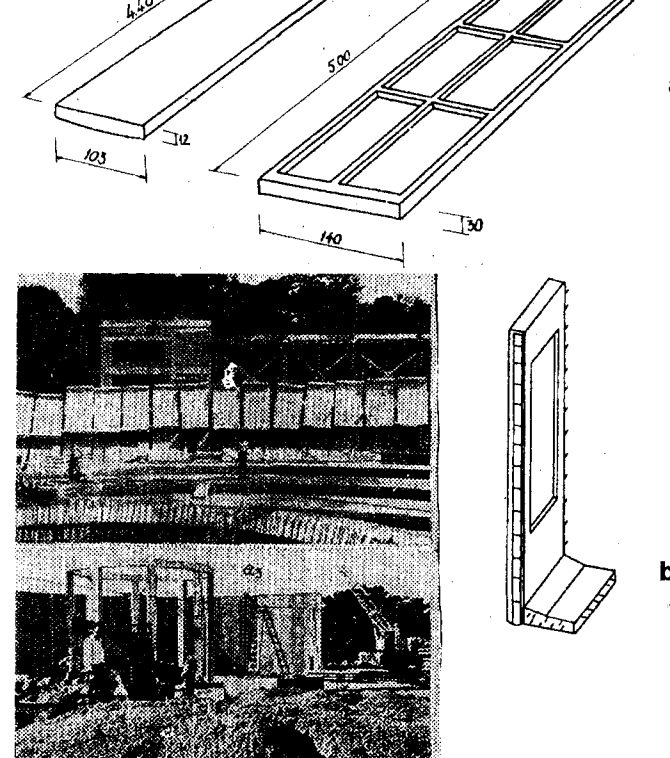


Fig. 5.11.
Elemente prefabricate
utilizate la realizarea
rezervoarelor cu **pereți
prefabricați**,
precomprimați prin
înfășurare:
a - panouri cu secțiune
constantă sau
nervurate;
b - panouri prefabricate
continui cu porțiunea
adiacentă de inel de
rezemare;
c - montaj elemente
cilindrice prefabricate
cu rază mare de
curbură.

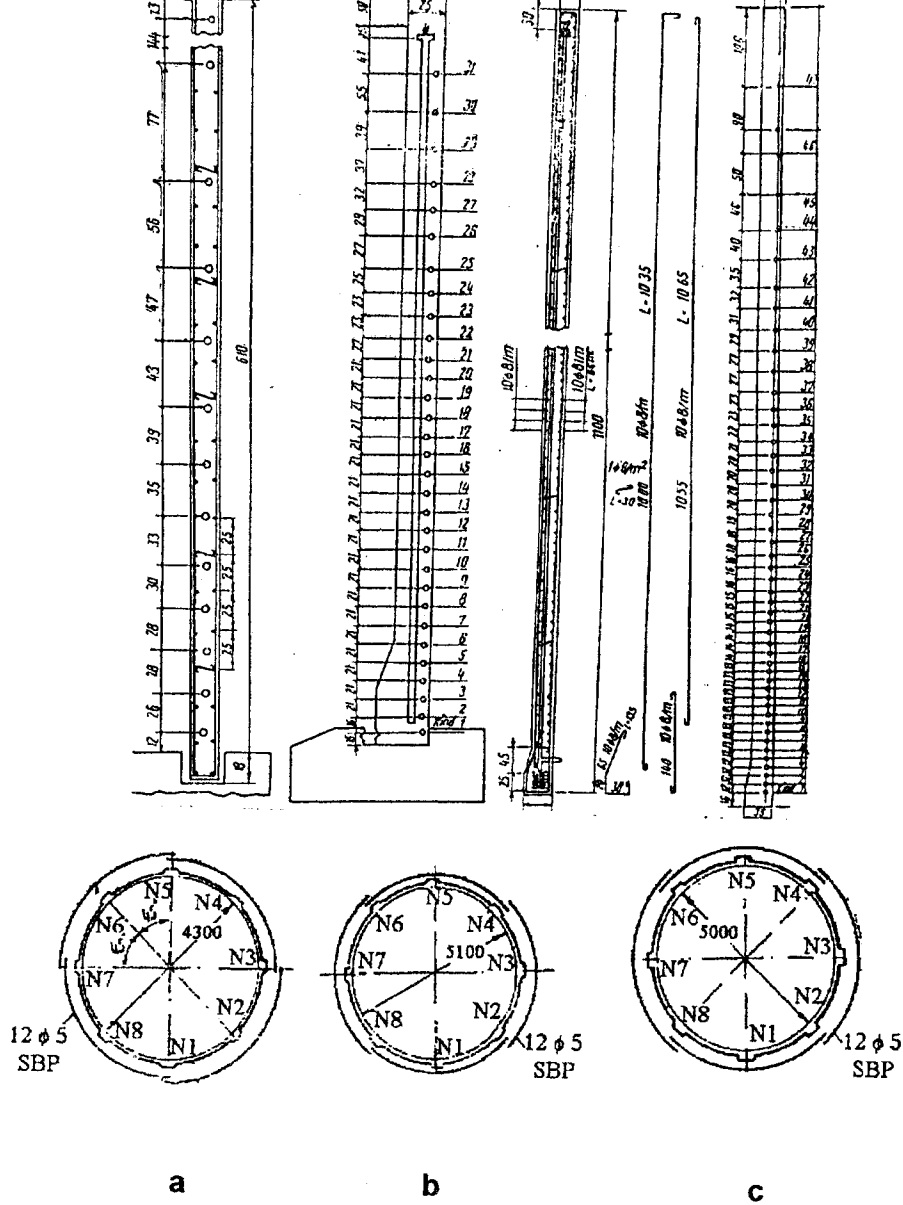


Fig. 5.12 Dispunerea fasciculelor segmentate pe înălțimea pereților cilindrici ai rezervoarelor realizate în România; a - de 10.000 m³; b - rezervor de 15.000 m³ capacitate; c - de 20.000 m³.

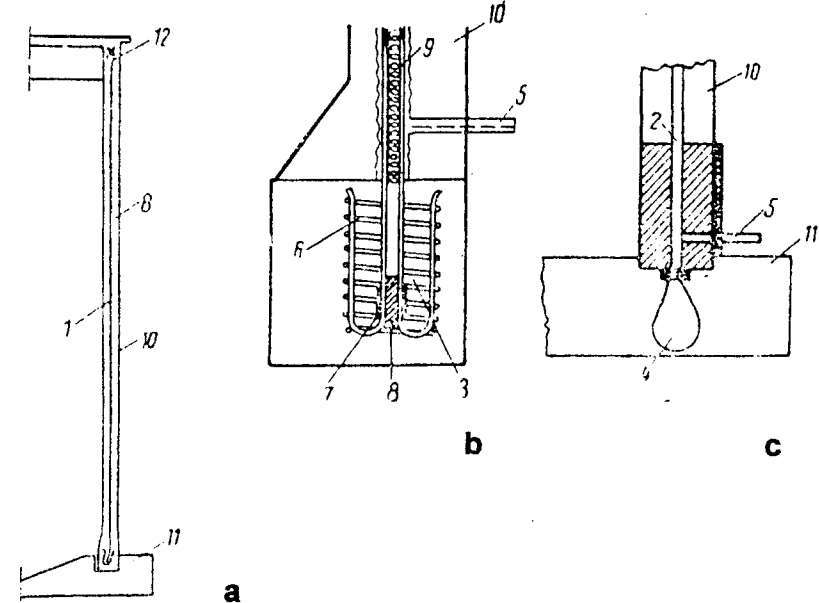


Fig. 5.13. Precomprimarea verticală a pereților cilindrici ai rezervoarelor din beton:

- a - traseu armătură postîntinsă, ancorată în inelul de fundație;
- b - detaliu zonă ancorare fascicul din sârmă de înaltă rezistență;
- c - detaliu ancorare bară;
- 1 - armătură postîntinsă/fascicul;
- 2 - bară;
- 3 - freta adiacentă capetelor sârmelor ancorate în beton;
- 4 - buclă de ancorare bară;
- 5 - ștuț țevă pentru eliminarea aerului la injectarea canalului;
- 6 - fretă din oțel moale;
- 7 - brățară ϕ 46 ... 50 mm;
- 8 - dorn;
- 9 - teacă PVC;
- 10 - perete BCA;
- 11 - radier;
- 12 - blocaj superior tip inel + con.

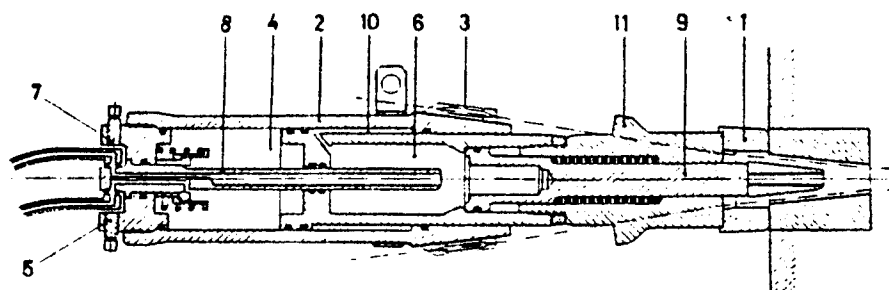


Fig. 5.14

Secțiune longitudinală printr-o presă cu dublu efect:

1 – inel de reazem; 2 – cilindru; 3 – pene/clavete pentru fixarea sârmelor la tensionare; 4 – camere de presiune pentru tensionare; 5 – orificiu de fixare a tubului de presiune pentru camera de tensionare; 6 – camera de presiune pentru blocarea sârmelor în ancorajul definitiv; 7 – orificiul de fixare a tubului de presiune pentru camera de blocare; 8 – tijă de legătură; 9 – pistonul de blocare a conului ancorajului; 10 – camera de presiune pentru revenirea presei la poziția inițială; 11 – proeminențe pentru declavetare.

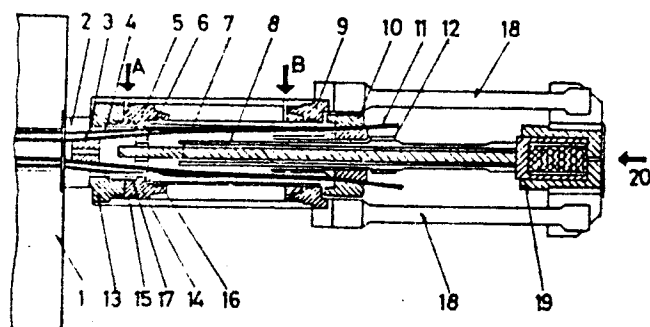


Fig. 5.15

Secțiune longitudinală printr-o presă cu gol central tip INCERC 120 în faza de tensionare:

1 – elementul precomprimat; 2 – inel; 3 – con; 4 – armături tensionate;
5 – rozetă – con de ordonare a sârmelor; 6 – rozetă simplă de ordonare;
7 – tijă de blocare; 8 – teacă de blocare; 9 – rozetă de blocare; 10 – inel
piston; 11 – con de inventar; 12 – piuliță cu filet pătrat; 13 – cilindrul
preseii; 14 – piston; 15, 16, 17 – garnituri de etanșare; 18 – brațe;
19 – cric de blocare; 20 – admisie lichid în cric.

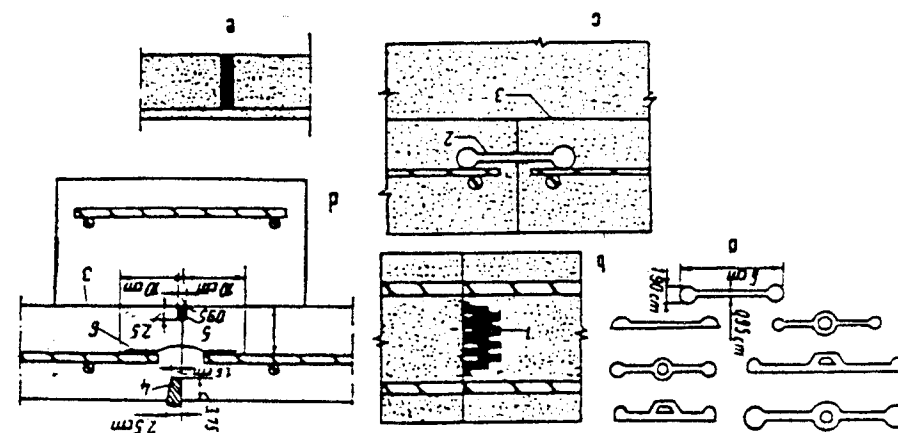


Fig. 5.16

Realizarea constructivă a rosturilor de dilatație și de tasare:

a – membrane de cauciuc; **b** – membrane din material plastic; **c** – cu diafragmă din cauciuc; **d** – cu diafragmă de cupru sau zinc; **1** – labirint de material plastic; **2** – diafragmă; **3** – produs ce împiedică aderența; **4** – bitum cauciucat; **5** – mastic; **6** – diafragmă de cupru; **e** – rost cu benzi de cauciuc sau frânghie gudronată și mastic de bitum.

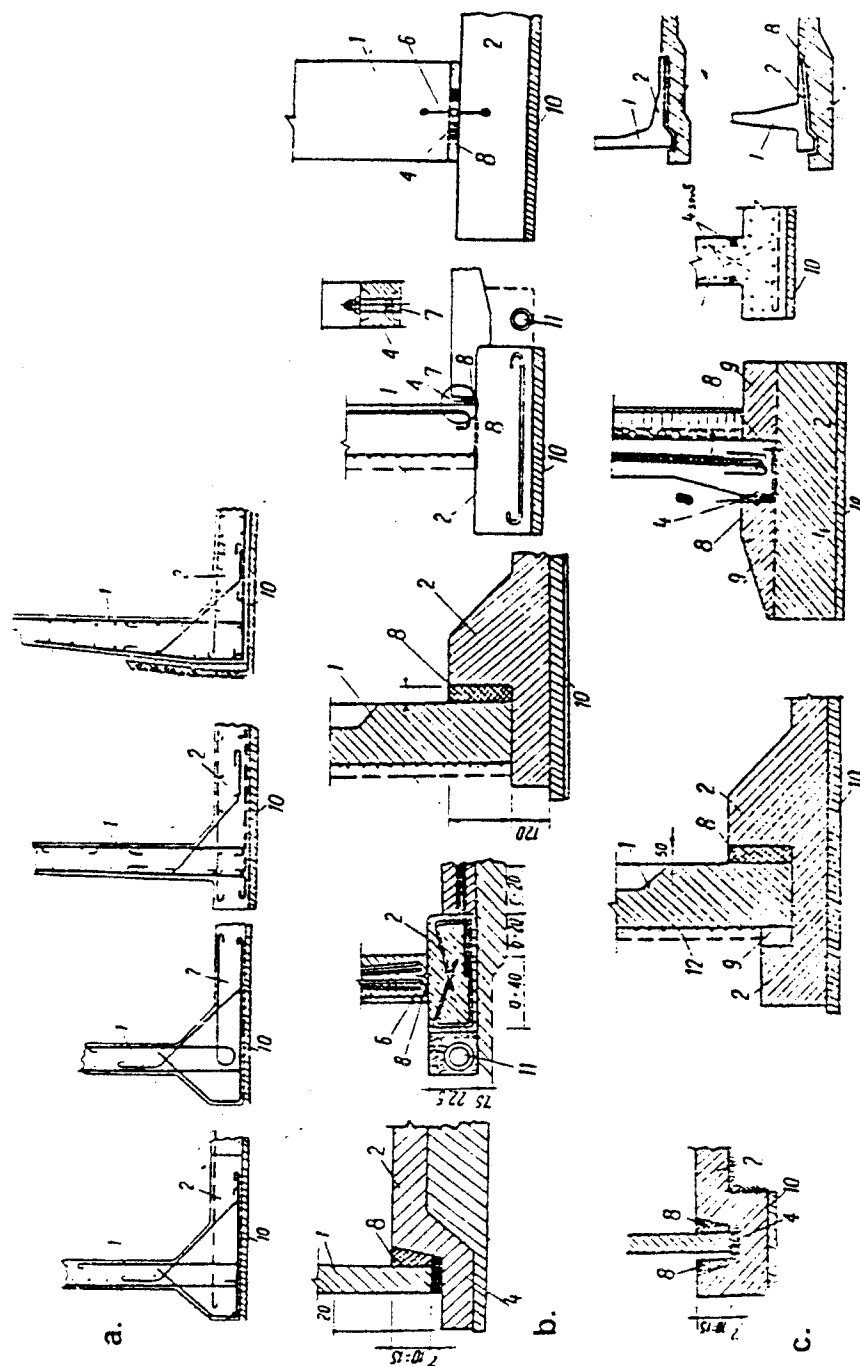
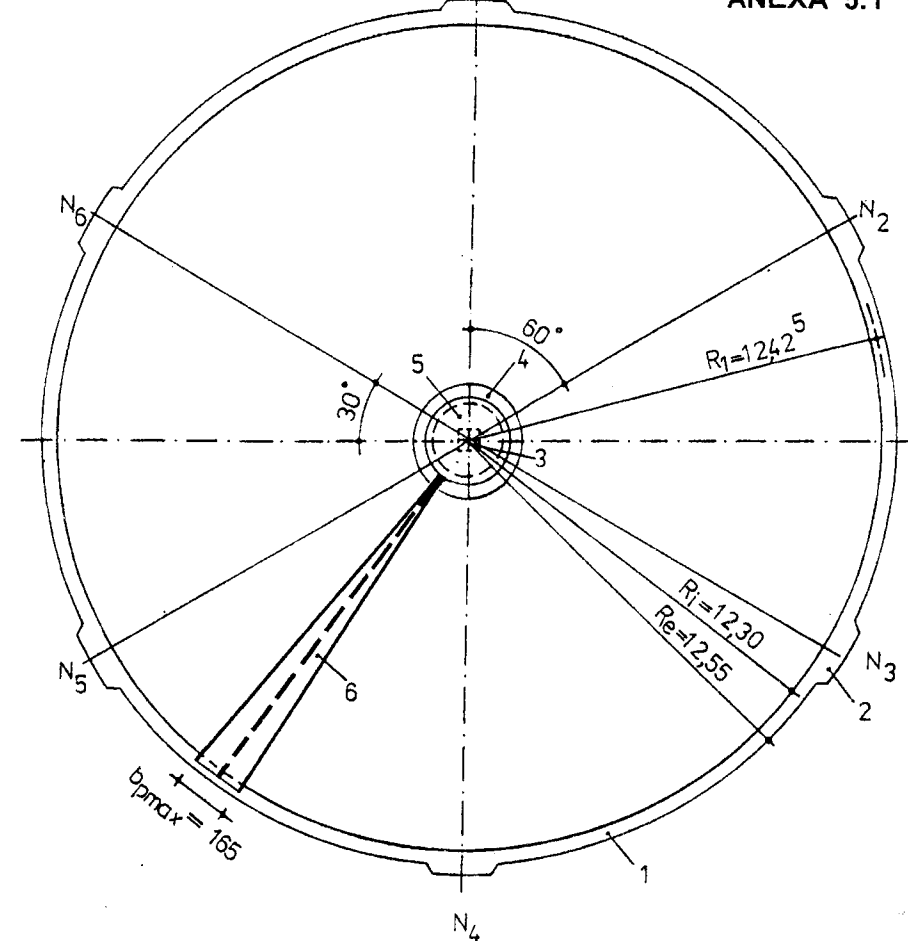


Fig. 5.17 Tipuri de legături perete cilindric - radier:

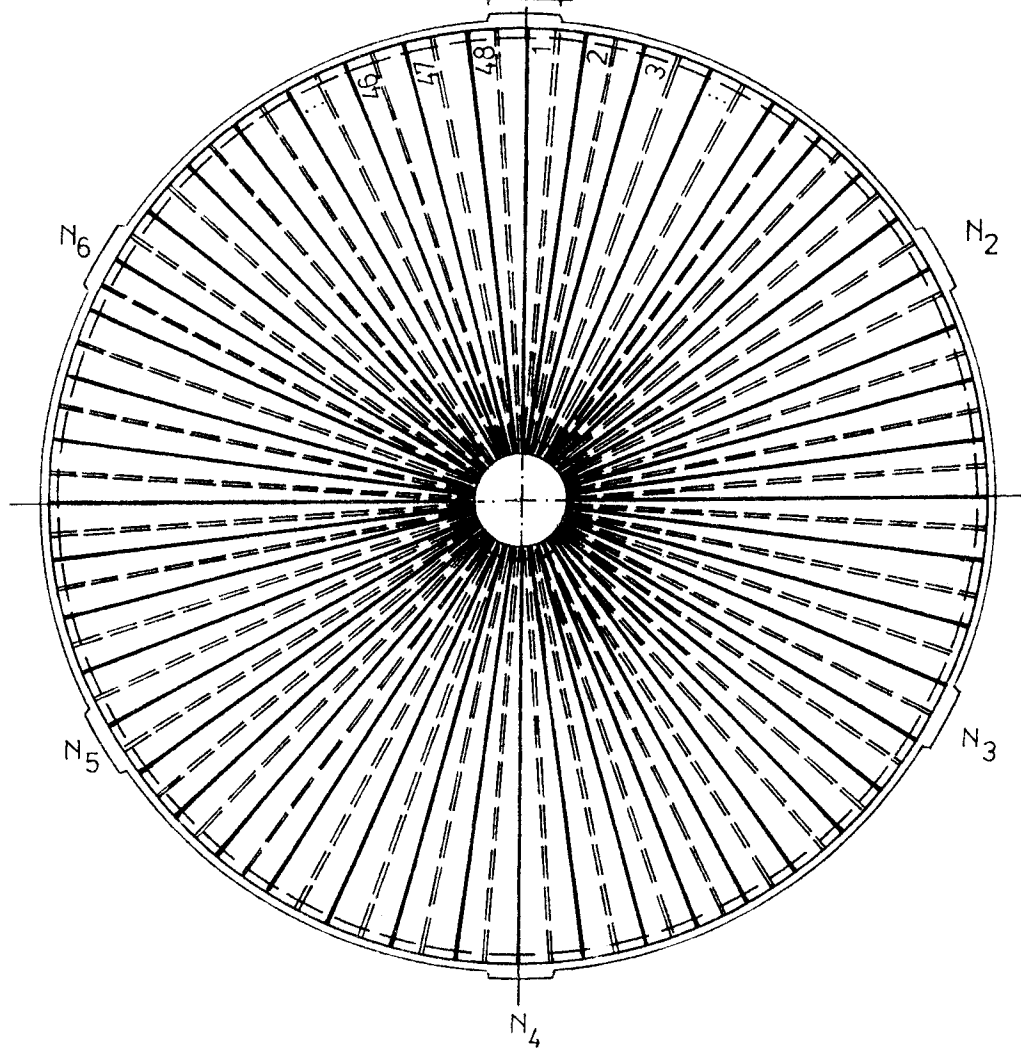
a - monolite; b - reazeme simple; c - articulații fixe; 1 - perete; 2 - inel radier; 3 - mortar sau beton de matar; 4 - benzi sau cordoane de cauciuc; 5 - frânghie gudronată; 6 - hidroizolație din cauciuc (waterstop); 7 - bulon de fixare cu piuliță; 8 - mastic de bitum cu sau fără fulgi de azbest; 9 - beton de completare sau fixare; 10 - dren; 11 - beton de egalizare; 12 - dren de protecție a armăturii pretenșionate.



Planșa 1.

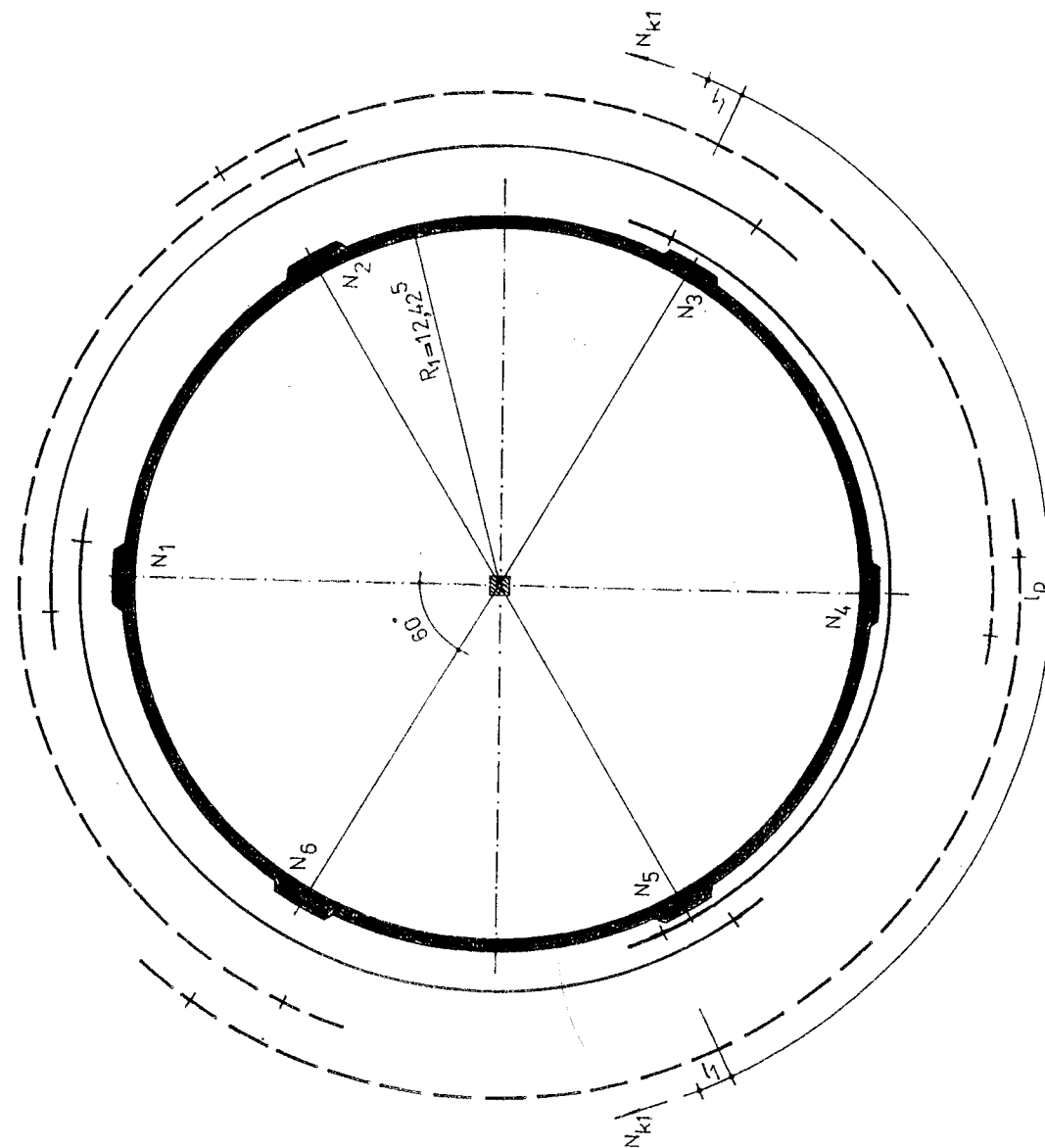
Alcătuirea și elementele geometrice ale rezervorului în secțiune orizontală:

- 1 - perete cilindric circular din BP;
- 2 - nervură pentru ancorarea fasciculelor postîntinse segmentate;
- 3 - stâlp central cu secțiune rectangulară din BA, turnat in situ;
- 4 - consolă circulară din BA;
- 5 - element prefabricat de închidere orizontală tip cheson circular din BA;
- 6 - element prefabricat de acoperire din BP cu armătură postîntinsă.



Planșa 2.

Schema de montaj a elementelor prefabricate de acoperire, din BP cu armătură preîntinsă, având secțiunea transversală în formă de T, cu placa de formă trapezoidală în plan orizontal.



Planșa 3.

Schema de dispunere alternativă a inelelor de armătură pretensionată, alcătuite din fascicule postîntinse segmentate.

5.1. EXIGENȚE PRIVIND ALCĂȚUIREA CONSTRUCTIVĂ A REZERVOARELOR

Prin alcătuire constructivă și simulări numerice corespunzătoare, trebuie să se obțină recipienti care să poată prelua, în bune condiții, solicitările induse de acțiunile la care sunt supuși aceștia durată execuției, în exploatarea curentă, respectiv la cutremure moderate/majore, fără a-și pierde etanșeitatea.

În acest scop, este recomandabil să se adopte soluții care au fost aplicate cu bune rezultate și care s-au comportat satisfăcător.

Normele românești /6/, /14/ recomandă adoptarea cu precădere a soluțiilor monolite și evitarea realizării recipientilor în soluție prefabricată datorită dificultăților de realizare a soluțiilor de îmbinare (rosturi) care să asigure etanșeitatea și preluarea în bune condiții a eforturilor de lunecare.

La **adoptarea soluțiilor prefabricate** trebuie respectate următoarele exigențe:

- realizarea de rosturi armate cu o lățime de minimum 25 cm și cu o profilare și tratare corespunzătoare a fețelor spre rost a elementelor prefabricate;
- precomprimarea pereților realizați din elemente prefabricate, în cazul structurilor axial simetrice;
- conceperea/realizarea de îmbinări corespunzătoare ale elementelor prefabricate cu radierul și eventual cu acoperișul, bazate pe verificări experimentale concludente.

În cazul realizării în soluție prefabricată a pereților recipientilor paralelipedici, atunci când această soluție este inevitabilă, este obligatorie prevederea următoarelor măsuri:

- executarea zonelor de colț și de legătură în soluție monolită;
- dimensionarea și alcătuirea corespunzătoare a nodurilor, cu verificări experimentale concludente, privind comportarea seismică potențială sau la tasări diferențiate.

În acest sens, trebuie ca legătura pereților cu radierul și planșeul de acoperiș să fie o legătură de continuitate, monolită, pentru a se reduce pericolul de alunecare pe fundație și de deplasare laterală a planșeului.

Se poate admite ca îmbinarea peretelui cu radierul să se realizeze sub forma unei legături speciale realizate cu cordoane de cauciuc care să îndeplinească următoarele funcțiuni:

- să asigure etanșeitatea la acest nivel;
- să permită deplasarea cvasiliberă a peretelui cilindric la precomprimare;
- să se comporte ca o articulație în faza de exploatare sau în timpul acțiunii seismice probabile în amplasament.

Se recomandă prevederea de îngroșări locale ale radierului la nivelul legăturilor cu peretele exterior și cu stâlpii interiori de susținere a planșeului de acoperiș.

Structura de rezistență a cuvei recipientului se va separa de camera de vane sau de alte construcții adiacente, cu rosturi etanșe definitive, având lățimea de minimum 35 mm.

Rosturile etanșe definitive din radierul și pereții rezervoarelor se dispun în funcție de necesitatea diminuării efectelor negative provocate de contracția betonului. Alegerea schemei rosturilor se va baza pe necesitatea satisfacerii condițiilor de rezistență și stabilitate la lunecare sau răsturnare a subansamblurilor structurale rezultate prin prevederea acestor rosturi.

Trecerile conductelor prin pereții recipientilor vor fi realizate în mod obligatoriu cu piese de trecere etanșe cu presetupă. În același timp, se va analiza și se va prevedea, dacă este necesar, ca la ieșirea din recipient să se monteze compensatori de dilatare pe conducte, ce permit deplasări liniare și unghiulare.

Piese grele vor fi rezeimate separat.

La **recipientii amplasați pe terenuri macroporice** sau sensibile la umezire, conductele vor fi montate în galerii și canivouri vizitabile, respectându-se prevederile normelor privind execuția construcțiilor fundate pe terenuri sensibile la înmuiere.

Grosimea plăcii radierului recipientului se stabilește prin calcul în funcție de mărimile solicitărilor, de clasa și gradul de impermeabilitate a betonului, respectiv de presiunea exercitată de lichidul înmagazinat, fără a fi mai mică de 20 cm.

Grosimea pereților exteriori, stabilită prin calcul, nu va fi mai mică decât valorile:

- 18 cm - perete din beton armat monolit;
- 20 cm - perete din beton armat monolit precomprimat cu fascicule înglobate;
- 15 cm - perete din elemente prefabricate cu înălțimea $h \leq 4$ m;
- 17 cm - perete din elemente prefabricate cu $4 \text{ m} < h \leq 6$ m;
- 19 cm - perete din elemente prefabricate cu $h > 6$ m.

În cazul recipientilor pentru lichide agresive, grosimea peretelui va fi de cel puțin 20 cm.

Grosimea elementelor prefabricate pe zona spre rostul vertical de îmbinare va fi de minimum 20 cm. Îngroșarea va fi realizată având în vedere următoarele condiții:

- porțiunea cu această grosime va avea cel puțin 20 cm lățime;
- panta îngroșării nu va depăși valoarea $\frac{1}{4}$;
- dimensiunile și forma aleasă nu vor crea dificultăți la realizarea lucrărilor ulterioare (tencuieli, protecții) și la exploatarea (întreținerea) recipientului.

Grosimile minime ale stratului de acoperire cu beton a armăturii de rezistență din radier și perete, sunt explicitate în cap. 6 din STAS 10107/0-90.

În general, la **recipientii din beton armat**, pentru armarea pereților și radiatorului se vor utiliza bare de oțel cu profil periodic PC 60 sau PC 52 (STAS 438/1-89).

La recipientii amplasați în medii cu agresivitate foarte slabă sau slabă este posibilă și armarea cu plase sudate din STNB sau STPB (STAS 438/3-89). În cazul mediilor cu agresivitate intensă și foarte intensă (medie sau puternică), acest tip de armare nu este permis.

Oțelul cu suprafață netedă, tip OB 37, va fi utilizat ca armătură numai în cazurile în care secțiunile rezultate din calcul pentru armăturile cu profil periodic nu satisfac condițiile referitoare la procentul minim de armare, diametrele minime sau respectiv distanțele maxime între bare.

În afara satisfacerii condițiilor evidențiate prin calcul, **armăturile din pereții rezervoarelor din beton armat trebuie să respecte următoarele condiții:**

- procent minim de armare: 0,1 % din secțiunea de beton, pe fiecare față și fiecare direcție;
- diametrul minim: 6 mm pentru armăturile orizontale; 8 mm pentru armăturile verticale;
- distanța maximă dintre armăturile orizontale: 20 cm (în baza considerentelor tehnologice, legate de ușurarea punerii în operă a betonului, aceasta se poate mări la 25 cm);
- distanța maximă dintre armăturile verticale: 25 cm;
- distanța minimă dintre armăturile orizontale: 15 cm;
- distanța minimă dintre armăturile verticale: 12,5 cm.

Se menționează faptul că la stabilirea distanțelor efective dintre armături trebuie să se țină seama și de tehnologia de execuție, în special în ceea ce privește turnarea și compactarea betonului.

La fața pe care se face betonarea, rețeaua de armături va fi astfel concepută încât pe cel puțin o direcție să respecte distanța de minimum 15 cm.

Armăturile din placa radiatorului trebuie să respecte aceleași condiții ca și armăturile orizontale din pereți; se recomandă ca armătura superioară din placa radiatorului să fie $d_{\min} = 8$ mm, la distanțe de maximum 20 cm sau $d_{\min} = 6$ mm, la maximum 15 cm.

La **pereții precomprimați pe ambele direcții**, alcătuiți din elemente prefabricate, armătura nepretensionată cu rol constructiv poate fi alcătuită cu câte o plasă sudată (STNB sau STPB) cu $d_{\min} = 4$ mm la maximum 15 cm pe ambele direcții și pe ambele fețe, cu respectarea instrucțiunilor tehnice C 170-87.

La **pereții precomprimați numai pe orizontală**, precum și la pereții din beton monolit, precomprimați pe ambele direcții, se acceptă dispunerea ca armătură nepretensionată pe ambele fețe, a barelor din oțel PC 60 sau PC 52 cu $d_{\min} = 8$ mm la maximum 25 cm pe verticală și $d_{\min} = 10$ mm la maximum 20 cm pe orizontală, respectiv a plaselor sudate din STPB, cu respectarea instrucțiunilor tehnice C 170-87.

În funcție de înălțimea maximă a coloanei de lichid înmagazinat și de gradul de agresivitate al lichidului sau mediului înconjurător, **betonul destinat realizării recipientilor din beton armat trebuie să îndeplinească condițiile din ANEXA 5.2.**

Înălțimea coloanei de lichid înmagazinat (m)	Condiții tehnice	Condiții de agresivitate lichid / mediu	
		foarte slabă sau slabă	intensă sau foarte intensă, medie sau puternică
< 4	- Grad impermeabilitate min.	P_4^{10}	P_8^{10}
	- raport A/C max.	0,55	0,50
	- dozaj minim de ciment (kg/m ³) pentru agregate: 0 ... 16 mm 0 ... 31 mm	360 325	430 390
4 ... 12	Clasa betonului min.	C 16/20	C 20/25
	- Grad impermeabilitate min.	P_8^{10}	P_{12}^{10}
	- raport A/C max.	0,50	0,45
> 12	- dozaj minim de ciment (kg/m ³) pentru agregate: 0 ... 16 mm 0 ... 31 mm	430 390	500 455
	Clasa betonului min.	C 20/25	C 25/30
	- Grad impermeabilitate min.	P_{12}^{10}	P_{12}^{10}
> 12	- raport A/C max.	0,45	0,45
	- dozaj minim de ciment (kg/m ³) pentru agregate: 0 ... 16 mm 0 ... 31 mm	500 455	500 455
	Clasa betonului min.	C 25/30	C 25/30

Note:

1. În cazul aplicării unor membrane etanșe, rezistente la acțiunea lichidului sau mediului, gradul de impermeabilitate se limitează la P_4^{10} .

2. Agregatele 0 ... 16 mm sau 0 ... 20 mm se folosesc pentru prepararea betonului ce urmează a fi turnat în pereți și radier având grosimea mai mică sau egală cu 20 cm.

3. În funcție de desimea armăturilor în zona de poziționare a profilelor de etanșare din PVC plastifiat se poate prevedea prepararea betoanelor cu agregate 0 ... 16 mm (0 ... 20 mm) și pentru elemente cu grosimi mai mari de 20 cm.

4. În cazul folosirii agregatelor 0 ... 20 mm, dozajul minim de ciment va corespunde mediei valorilor prevăzute pentru agregate 0 ... 16 și 0 ... 31 mm.

Părțile de structură care vin în contact cu lichidul și sunt concepute din beton monolit vor fi turnate continuu, fără întreruperi și rosturi de lucru, cu excepția rosturilor prevăzute în proiect, alcătuite în baza unor măsuri speciale.

În vederea evitării fisurării radierului datorită contracției, se recomandă /6/ următoarele măsuri:

- la recipientii cu diametrul sau latura mai mare de 30 m, se vor prevedea rosturi de contracție, distanțele dintre acestea depinzând de mărimea contracției, procentul de armare și tipul de izolație (elastică sau rigidă);

- la realizarea rosturilor de contracție se va asigura continuitatea armăturii cel puțin la plasa inferioară.

În cazul precomprimării radierului se poate renunța la rosturile de contracție.

La pereții din beton armat se recomandă prevederea de rosturi de contracție, la distanțe de maximum 30 m.

Rosturile de dilatație se vor prevedea la distanța rezultată din calcul, în funcție de condițiile specifice constructive și de exploatare.

Alcătuirea rosturilor permanente trebuie să asigure etanșeitățile recipientului, concordanța cu ipotezele de calcul și compatibilitatea cu deformațiile elementelor în fazele de execuție a lucrărilor, de exploatare, incluzând și eventualele tasări diferențiate.

La **alegerea materialelor de etanșare** se va ține seama de exigențele privind sănătatea și durabilitatea, în funcție de natura lichidului înmagazinat.

În cazul pereților din beton precomprimat la care se prevede rezemarea articulată a peretelui, rostul orizontal se umple cu microbeton C12/15, cu agregate 0 ... 3 și 3 ... 7 mm.

Blocarea rostului se face după precomprimarea peretelui.

În cazul adoptării fundației inelare pentru peretele cilindric, independentă de radier (cu rost), aceasta se va executa înaintea terminării radierului.

În continuare se evidențiază exigențele care trebuie satisfăcute la **precomprimarea pereților recipientilor cu fascicule postîntinse, dispuse în interiorul peretelui**, sau prin înfășurare cu sârmă continuă sub tensiune mecanică.

Utilizarea altor sisteme sau procedee de precomprimare se face pe bază de specificații tehnice sau agrement tehnic.

Nu se recomandă soluția de realizare a recipientilor din elemente prefabricate asamblate prin precomprimare cu toroane TBP dispuse la exterior fără o protecție completă, inițială, a acestora, care să le asigure durabilitatea pe durata proiectată de serviciu.

Recipientii proiectați prin înfășurare se execută numai în medii cu agresivitate foarte slabă și slabă, cu condiția asigurării certe a condițiilor referitoare la protecția prin torcretare în termenele prescrise.

Precomprimarea se va face după un timp suficient de la efectuarea eventualelor reparații (injectări fisuri, remedieri ale zonelor segregate), astfel încât zonele reparate să poată prelua în cele mai bune condiții eforturile din precomprimare.

În cazul precomprimării circulare, peretele se poate realiza și cu contur poligonal, cu condiția verificării eforturilor suplimentare care intervin ca urmare a abaterii de la conturul circular.

În cazul precomprimării prin înfășurare continuă, peretele va avea o formă cilindrică și fața exterioară netedă, neadmițându-se nervuri verticale sau orizontale.

Se poate adopta și un contur poligonal dacă instalația de înfășurare permite precomprimarea în aceste condiții, ținând seama de caracteristicile tipului de instalație disponibilă pentru înfășurare.

Se pot prevedea întreruperi ale înfășurării pentru amplasarea golurilor necesare, luând măsuri corespunzătoare de armare și ținând seama și de caracteristicile instalației de pretensionare folosite.

Caracteristicile principale ale procedeelor de precomprimare cu fascicule postîntinse vor fi considerate în conformitate cu prevederile normativului C 21-85 și cu modificările prevăzute în **ANEXA 5.3**, în cazul în care ancorajele reazemă pe nervurile peretelui.

Nu se vor prevedea fascicule (verticale) cu capetele înglobate în beton de la turnare, decât cu luarea unor măsuri speciale de protecție anticorozivă a sârmelor; în acest caz, durata de la montarea fasciculelor până la pretensionare și injectare nu va depăși 4 luni.

ANEXA 5.3 /6/

Caracteristica	Fascicule din sârme paralele SBP I	
	12 ϕ 5 mm	12 ϕ 7 mm
Dimensiunile minime ale plăcilor de repartiție (mm)	150 x 150 x 14	180 x 180 x 16
Distanța minimă de la axul ancorajului până la marginea nervurii (mm):		
- spre exterior	150	130
- spre perete (interior)	110	110

ANEXA 5.4 /6/

Clasa de agresivitate a mediului	Grosimea minimă de acoperire cu torcret a armăturii înfășurate (mm)
Agresivitate foarte slabă	25
Agresivitate slabă	30

ANEXA 5.5 /6/

Tipul abaterii admise față de proiect	Abaterii limită admise
1. Abaterii limită de la forma circulară la recipientii cilindrici, în raport cu lungimea razei: $R \leq 7$ m 7 m $< R \leq 20$ m $R > 20$ m unde R este raza recipientului	± 16 mm ± 20 mm $\pm R/1000$
2. Abaterii limită de la grosimea peretelui	± 5 mm
3. Abaterii limită de la verticalitatea suprafețelor și muchiilor pereților (încălinarea maximă a acestora)	3 mm/m dar nu mai mult decât 16 mm
4. Abaterii limită la montarea ancorajelor fasciculelor	± 8 mm
5. Abaterii limită la lățimea feței de rezemare a ancorajelor fasciculelor	± 8 mm
6. Abaterii limită la dimensiunile elementelor prefabricate de la: - lungimile (L), pentru cazurile: $L \leq 3$ m 3 m $< L \leq 9$ m $L \leq 9$ m - lățime - grosime - diferență la lungimea diagonalelor - rectiliniaritatea muchiilor și deformarea maximă din precomprimare - unghiul dintre fața exterioară și fața din rost	± 10 mm $\pm 12,5$ mm ± 25 mm ± 6 mm ± 5 mm ± 10 mm 2 mm/m, dar nu mai mult decât 10 mm $\pm 2^\circ$
7. Abaterii limită la lățimea rosturilor verticale între elementele prefabricate	+ 15 mm ... - 5 mm
8. Decalarea maximă a fețelor exterioare ale elementelor prefabricate în dreptul rosturilor	20 mm

Notă:

În cazul recipientilor precomprimați prin înfășurare continuă, valorile abaterilor limită admise trebuie corelate cu caracteristicile instalației de înfășurare.

La precomprimarea prin înfășurare continuă se utilizează sârmă SBP ϕ 5 mm.

În jurul recipientilor precomprimați prin înfășurare continuă se va asigura o distanță liberă de minimum 2,20 m pentru buna desfășurare a operațiilor de înfășurare și torcretare. Orice construcție amplasată la o distanță mai mică se va executa după realizarea fazelor de înfășurare și torcretare.

Protecția armăturii înfășurate se asigură printr-un strat de torcret aplicat prin procedeul uscat, în conformitate cu prevederile instrucțiunilor tehnice C 130 – 78.

Torcretarea se face în straturi succesive, astfel încât să se realizeze o grosime de protecție peste armătura înfășurată, egală cel puțin cu valorile indicate **ANEXA 5.4**, în funcție de agresivitatea mediului.

Protecția prin torcretare se aplică după efectuarea probei de etanșeitate a recipientului, însă nu mai târziu de 30 zile de la terminarea precomprimării în cazul recipientilor amplasați în medii cu agresivitate foarte slabă, respectiv de 15 zile în medii cu agresivitate slabă.

Pe durata executării și întăririi stratului de protecție, recipientul va fi menținut plin cu apă la nivelul maxim de exploatare.

Intervalul de timp între aducerea armăturii la punctul de lucru și pretensionarea prin înfășurare, nu va depăși 15 zile consecutive.

Conform /6/, în cazul în care execuția lucrărilor are loc în medii cu agresivitate medie, armăturile postîntinse ale recipientilor din beton precomprimat se vor anfila, pretensiona și proteja într-un interval de maximum 7 zile din momentul aducerii la punctul de lucru.

Intervalul de timp între tensionarea armăturilor și injectarea canalelor nu va depăși 3 zile.

Abaterile și toleranțele admise la execuția recipientilor din beton armat și beton precomprimat nu vor depăși valorile menționate în "Codul de practică pentru execuția lucrărilor din beton, beton precomprimat", în C 21-85, cu precizările din **ANEXA 5.5**, în măsura în care sistemul de precomprimare nu impune alte valori.

5.2. EXIGENȚE PRIVIND INSTALAȚIILE HIDRAULICE

La întocmirea proiectelor de instalații se va ține seama de reglementările tehnice în vigoare care se referă la proiectarea recipientilor cu destinații diverse: rezervoare de apă, decantoare, metantancuri.

În vederea funcționării corespunzătoare a recipientilor se vor prevedea măsuri care să asigure respectarea parametrilor tehnologici și funcționali.

O atenție deosebită se va acorda acestor măsuri, în cazul în care depășirea unor parametri (înălțimea de lichid, temperatura) poate conduce la creșterea apreciabilă a solicitărilor în elementele recipientului, deteriorarea unor instalații învecinate (ca urmare a deversării unor lichide agresive) sau degradarea terenului de fundare.

În acest scop:

a) La proiectarea pieselor de trecere și poziționarea lor se va prevedea ca reglarea acestora (strângerea presetupelor) să se poată face din exteriorul recipientului;

b) Piese de trecere trebuie montate în cofraje înainte de turnarea betonului, acordându-se o atenție deosebită compactării acestuia în jurul pieselor înglobate;

c) Nu se admite prevederea de goluri cu dimensiuni mari urmând ca piesele de trecere să fie montate și betonate ulterior;

d) La proiectarea pieselor de trecere prin pereți și a pieselor de racordare a conductelor verticale cu cele orizontale, se va ține seama de eventualele tasări diferențiate, care pot interveni în cazul terenurilor cu compresibilitate mare și al terenurilor sensibile la umezire. De asemenea, vor fi considerate efectele vibrațiilor și solicitărilor dinamice potențiale.

Instalațiile hidraulice la recipientii fundați pe pământuri sensibile la umezire se vor realiza în acord cu prevederile normativului P 7 – 92, astfel încât să se evite pierderile de lichid.

Se va prevedea izolarea termică a conductelor la care există pericolul ca apa să stagneze și să înghețe.

Piese de fixare a conductelor, instalațiilor și a altor confecții metalice nu vor străpunge peretele cilindric.

Piesele metalice înglobate în beton vor fi astfel alcătuite încât să nu necesite suduri la distanțe mai mici de 0,20 m de la suprafața betonului, evitând fenomenul de prăjire a acestuia.

5.3. REALIZAREA EXIGENȚELOR PRIVIND ETANȘEITATEA, IZOLAREA TERMICĂ, IZOLAREA HIDROFUGĂ EXTERIOARĂ ȘI PROTECȚIA ANTICOROZIVĂ

În cazul recipientilor executați monolit care nu conțin lichide agresive, la părțile în contact cu lichidul, se vor prevedea **tencuieli torcretate** sau aplicate în straturi succesive conform instrucțiunilor tehnice C 130 – 78, respectiv alte protecții cu materiale etanșe (de exemplu - membrane etanșe), inclusiv pentru îndeplinirea condițiilor de protecție sanitară, pe bază de agremente tehnice.

În cazul recipientilor pentru lichide nealimentare, cu acordul proiectantului, se poate renunța la tencuirea pereților, dacă la **proba cu apă**, pierderile nu depășesc $0,25 \text{ l/m}^2$ și zi, iar eventualele pete de umezire constatate la exterior nu mai apar la repetarea probei, după executarea unor remedieri locale sau prin fenomenul de colmatare.

În cazul recipientilor care necesită protecții anticorozive exterioare pe suprafețele îngropate, acestea vor fi tencuite în prealabil cu mortar M 100, realizat cu cimenturi cu rezistența mărită la agresivitatea respectivă. Dacă suprafața exterioară a betonului este de foarte bună calitate, se poate aplica protecția anticorozivă direct pe suprafața sablată în prealabil.

La realizarea șapelor pentru pante, indicate prin proiect, vor fi considerate prevederile pentru tencuieli.

Izolarea termică a recipientilor acoperiți se prevede atunci când condițiile de exploatare impun ca temperatura fluidului înmagazinat să nu depășească anumite limite.

Dimensionarea izolației termice se face pe baza unui bilanț termic, în care se va ține seama de temperatura lichidului la intrare, temperatura exterioară și durata de stagnare.

La recipientii pentru înmagazinarea apei, bilanțul termic pe timp de iarnă poate lua în considerare și **ipoteza formării unui strat**

de gheață a cărei grosime probabilă se va stabili în funcție de durata de stagnare a apei.

Detaliile de alcătuire, execuție și recepționare a izolațiilor termice vor fi concepute și realizate în conformitate cu normativul C 107 – 82.

Se menționează faptul că izolația termică se execută după efectuarea probei de etanșeitate a rezervoarelor.

La recipientii îngropați, asupra cărora acționează numai umiditatea naturală a pământului, se va prevedea pe fața exterioară a pereților o **izolație hidrofugă**, din două straturi de bitum topit.

Izolarea acoperișului se va face în conformitate cu prevederile din normativul C 112 – 86.

În cazul recipientilor fundați sub nivelul apei subterane sau la care se consideră că este posibilă ridicarea acestuia peste nivelul radierului, prevederea izolației hidrofuge la exteriorul recipientului se va face conform prevederilor din normativul C 112–86, în situațiile în care:

a) nu se poate asigura o protecție anticorozivă împotriva apei subterane prin măsuri privind rețeta betonului;

b) lichidul stocat în recipient este folosit în industria alimentară, sau apa trebuie să fie potabilă;

c) la interiorul recipientului se prevede o protecție anticorozivă specială, proprie lichidului stocat, protecție care nu poate fi aplicată, sau care nu poate rezista pe un suport umed. În această circumstanță, prevederea izolației hidrofuge este necesară indiferent de faptul că recipientul se află, sau nu, sub nivelul pânzei freatice.

La recipientii supraterani pentru înmagazinarea apei potabile, se recomandă ca ultimul strat al izolației hidrofuge a acoperișului să fie reflectorizant sau de culoare deschisă.

Alcătuirea, execuția și recepționarea izolațiilor hidrofuge vor fi în conformitate cu STAS 2355/1-85, STAS 2355/2-87, STAS 2355/3-87 și normativul C 112-86, cu următoarele mențiuni:

a) la alegerea tipului de izolație hidrofugă se va ține seama de agresivitatea terenului (naturală sau provocată de industrie);

b) se va asigura continuitatea straturilor verticale și orizontale ale izolațiilor hidrofuge prin racordări corespunzătoare;

c) alegerea stratului de protecție a izolației hidrofuge se va face ținând seama de poziția și înclinarea elementului pe care se aplică izolația și de condițiile de exploatare a recipientului;

d) în zonele în care conductele traversează peretele recipientului se vor lua măsuri speciale pentru împiedicarea accesului apei între beton și hidroizolație, prin detalii corespunzătoare (prevederea de flanșe de strângere).

Recipientii din beton armat și din beton precomprimat vor fi protejați, atât împotriva agresivității lichidului înmagazinat, cât și a celei a mediului în care sunt amplasați.

Gradul de agresivitate față de beton al lichidului înmagazinat se va stabili, în funcție de natura și concentrația agenților corozivi, conform datelor din "Codul de practică pentru execuția lucrărilor din beton, beton armat și beton precomprimat" (C 140-186).

În cazurile în care acționează simultan doi sau mai mulți agenți agresivi, stabilirea gradului de agresivitate și elaborarea soluției de protecție vor fi stabilite cu multă atenție, prin consultarea unui institut de specialitate.

În cazurile în care lichidul înmagazinat atinge temperaturi peste 30° C, se va trece la gradul de agresivitate imediat superior.

Gradul de agresivitate naturală a terenului se va stabili pe baza indicațiilor din "Codul de practică pentru execuția lucrărilor din beton, beton armat și beton precomprimat", iar cel al mediului aerian exterior și interior (peste nivelul lichidului) pe baza instrucțiunilor tehnice C 170-87 și a "Codului de practică pentru execuția lucrărilor din beton, beton armat și beton precomprimat".

În cazul în care asupra unor părți ale recipientului acționează atât agresivitatea din teren, cât și cea din mediul aerian, se vor adopta măsuri de protecție exterioară, care să corespundă ambelor agresivități.

La proiectarea protecțiilor anticorozive se va ține seama de gradul de agresivitate interioară și exterioară, de mărimea deformațiilor pe care trebuie să le permită stratul de protecție în diverse zone (mai ales la rosturi), de necesitatea ca în unele cazuri protecția anticorozivă să îndeplinească și rolul unei hidroizolații

elastice (de exemplu, în cazul recipientilor fundați pe pământuri sensibile la umezire), precum și de posibilitățile de aplicare și protejare la acțiuni mecanice (șocuri, vibrații).

În cazul în care alegerea cimentului este condiționată atât de agresivitatea interioară, cât și de cea exterioară, tipul cimentului pentru elementele structurii se va stabili în funcție de agresivitatea lichidului înmagazinat.

Pentru realizarea betoanelor și a structurilor suport pentru protecții (tencuieli) se vor prevedea cimenturi rezistente la agresivitatea respectivă, în conformitate cu instrucțiunile tehnice C 19 - 79.

Protecțiile anticorozive se vor aplica pe tencuială sau direct pe suprafața betonului sablat.

La realizarea recipientilor supuși acțiunii agresive, se vor considera și următoarele recomandări specifice:

- se va interzice fixarea scărilor, conductelor sau a altor elemente prin ancorare în pereți;

- se vor adopta soluții în care piesele de trecere, conductele și materialele de etanșare să fie rezistente la coroziune sau acestea vor fi protejate anticoroziv.

Materialele care intră în alcătuirea protecțiilor anticorozive se vor utiliza pe baza indicațiilor prescrise de producători și a agrementelor tehnice pentru produse.

Nu se recomandă folosirea tratamentelor simple de suprafață (fluatizare, silicatzare) și a vopsitoriilor nearmate, la presiuni mai mari de 0,3 daN/cm².

Pentru recipientii supuși la interior unor șocuri mecanice de exploatare, se vor utiliza protecții pe bază de placaje cu cărămizi de gresie antiacide sau protecții ale structurii cu zidării de cărămidă corespunzătoare ca rezistențe mecanice.

În aceste situații sunt indicate și unele măsuri suplimentare de protecție mecanică (grătare din lemn, jgheaburi, șicane) în zonele mai expuse.

Pentru recipientii supuși vibrațiilor sau trepidațiilor prin procesul tehnologic sau prin amplasare, se vor utiliza în general

materiale plastice, elastice, cărămizi cu profile de ancorare ("coadă de rândunică") precum și zidării de cărămidă.

Se interzice prinderea directă pe folii a placajelor verticale, pe înălțimi mai mari de 0,5 m.

Protejarea anticorozivă a rostului și suprafața rămasă vor asigura preluarea, în condiții de etanșeitate, a eforturilor care pot apare ca urmare a deplasărilor relative în rost.

La **executarea recipientilor din beton armat și beton precomprimat** se va ține seama de prevederile "Codului de practică pentru execuția lucrărilor din beton, beton armat și beton precomprimat", C 21-85 și C 130-78.

Execuția recipientilor se va face pe baza proiectelor și detaliilor de execuție, a caietului de sarcini și a fișelor tehnologice, urmărindu-se în mod deosebit realizarea unor betoane cu o structură compactă și uniformă, îndeplinindu-se următoarele cerințe:

- materialele componente vor fi ferite de impurificare și degradare;

- utilajele de compactare a betonului vor avea dimensiuni corelate cu grosimea elementului, distanța dintre armături și grosimea straturilor succesive de beton, pentru a permite o vibrație corespunzătoare (numărul acestora se va stabili astfel încât să se dispună de rezerve în cazul unor eventuale defecțiuni);

- se va întocmi un plan de betonare pentru a se asigura continuitatea turnării, precizându-se totodată numărul formațiilor de lucru;

- se vor prevedea instalațiile necesare de alimentare cu apă și evacuarea acesteia pentru efectuarea probei de etanșeitate în termenele stabilite.

Înainte de începerea fiecărei faze de lucru trebuie verificate:

- calitatea lucrărilor executate în faza anterioară;
- dacă utilajele necesare la betonare, precomprimare, torcretare funcționează corespunzător;
- dacă formațiile de lucru și-au însușit prevederile din caietele de sarcini și fișele tehnologice;
- respectarea normelor de protecție a muncii.

În cazul în care nivelul apei subterane din amplasament este deasupra cotei radierului, se vor lua măsuri de coborâre a nivelului apei cu cel puțin 0,50 m sub cota de fundare, nivel care va fi menținut până la terminarea lucrărilor.

În timpul execuției se va ține evidența activității de control a calității lucrărilor, documentele fiind atașate la **Cartea Tehnică a construcției**.

La **proiectarea cofrajelor și susținerilor** se va ține seama de succesiunea operațiilor legate de realizarea elementelor din beton, asigurându-se accesul mijloacelor de transport și de punere în lucrare a betonului.

La pereții din beton turnat monolit se va prevedea cofrarea progresivă a uneia din fețe, cu panouri de maximum 1,0 m înălțime, montate pe măsura turnării betonului.

La pereții din beton monolit, precomprimați prin înfășurare, se recomandă cofrarea integrală a feței interioare.

Se recomandă ca elementele de legătură ale cofrajului să nu traverseze peretele. În cazul în care acest lucru nu este posibil, se vor adopta soluții verificate, prin experimentări concludente, pentru asigurarea etanșeității zonelor traversate de legăturile utilizate.

Abaterile dimensionale, măsurate după montarea și strângerea cofrajelor înainte de betonare, vor fi cu cel puțin 30 % mai reduse decât cele admise pentru elemente finite.

Înainte de montarea cofrajelor la pereții din beton monolit vor fi verificate:

- poziționarea corectă a armăturilor la racordarea cu radierul;
- curățirea rostului;
- montarea pieselor de etanșare din rost.

Confecționarea, depozitarea și montarea armăturilor nepretensionate vor fi efectuate în conformitate cu prevederile "Codului de practică pentru execuția lucrărilor din beton, beton armat și beton precomprimat", cu următoarele precizări suplimentare:

- se vor utiliza numai distanțieri din mase plastice sau mortar, așezați între armături și fața cofrajului;

- armăturile dispuse pe cele două fețe ale peretelui vor fi menținute la distanța prevăzută în proiect, cu ajutorul unor distanțieri din oțel – beton;

- se interzice îndoirea armăturilor în cazul în care mustățile lăsate din radier nu se înscriu în conturul peretelui, executându-se vute locale pe înălțimea de înădare, cu acordul proiectantului;

- se vor lua măsuri de protecție la efectuarea eventualelor suduri, dacă există teci, respectiv garnituri din mase plastice sau cauciuc, deja montate.

La **prepararea betoanelor pentru recipienti** se vor folosi aditivi reducători de apă (1), antrenori de aer (2), superplastifianți (3), întârziatori de priză (4), în baza prevederilor "Codului de practică pentru execuția lucrărilor din beton, beton armat și beton precomprimat" sau acordurilor tehnice.

Lucrabilitatea amestecului de beton proaspăt necesară la punerea în lucrare, va corespunde unei tasări de 8 ... 12 cm pentru betoanele cu aditiv tip (1), (2), (4) și de 12 ... 18 cm pentru betoanele cu aditiv tip (3).

Se recomandă folosirea aditivilor tip (3) pentru elementele ce trebuie să asigure etanșeitatea în cazul în care există zone cu armături dese, respectiv se întrevăd dificultăți la compactare.

Pentru primul strat de la baza peretelui sau după întreruperea betonării, lucrabilitatea betonului va corespunde unei tasări de minimum 12 cm.

Dozajul de ciment se stabilește în funcție de clasa betonului, raportul A/C cu valoarea maximă admisă și lucrabilitatea necesară.

Granulozitatea agregatului total se va adopta conform prevederilor din "Codul de practică pentru execuția lucrărilor din beton, beton armat și beton precomprimat".

Definitivarea compoziției betonului se va face în baza rezultatelor încercărilor preliminare, efectuate conform prevederilor din "Codul de practică pentru execuția lucrărilor din beton, beton armat și beton precomprimat".

Prepararea, transportul și punerea în lucrare se vor face conform prescripțiilor tehnice în vigoare, completate cu următoarele precizări:

a) la prepararea betoanelor pompate se recomandă utilizarea aditivilor superplastifiați. Se va urmări ca procesul de pompare să fie continuu, fără întreruperi care favorizează blocarea betonului în conducte;

b) transportul betonului pentru distanțe mai mari de 100 m se va face numai cu autoagitatoare;

c) turnarea se va face continuu, în straturi orizontale de cel mult 40 cm înălțime și se vor evita rosturi de lucru în afara celor prevăzute în proiect.

Înălțimea liberă de cădere a betonului nu va depăși 0,5 m.

Intervalul între turnarea a două straturi succesive de beton nu trebuie să depășească timpul minim de începere a prizei, în funcție de condițiile de temperatură și de timpul de priză a betonului.

În cazul în care se depășește acest interval, înainte de reluarea betonării, pentru a asigura caracterul monolit al structurii, suprafața betonului vechi va bine curățată, părțile neaderente de beton și în special laptele de ciment vor fi îndepărtate. Curățirea betonului și pregătirea suprafeței pentru turnare se vor face ținând seama de instrucțiunile tehnice departamentale PE 713 – 90.

d) compactarea betonului se va face prin vibrație în conformitate cu prevederile din "Codul de practică pentru execuția lucrărilor din beton, beton armat și beton precomprimat".

Suprafețele de beton vor fi menținute umede până la vârsta de 14 ... 28 zile, în funcție de condițiile de expunere.

Se recomandă ca radierul să fie protejat prin acoperire cu un strat de apă sau un strat de nisip menținut în stare umedă.

În cazul pereților se recomandă protejarea betonului cu prelate menținute permanent umede.

Codul /6/ recomandă să se evite betonarea recipientilor atunci când temperatura mediului depășește 30°C.

Nu se admite betonarea recipientilor pe timp friguros (perioada 15 noiembrie – 15 martie), definit conform C 16 – 84.

Elementele prefabricate pentru pereți se vor realiza în fabrici sau poligoane specializate. Fața convexă a elementului, corespunzătoare feței exterioare a peretelui, nu se va sclivisi pentru a

se asigura o mai bună aderență a stratului de torcret la recipientii precomprimați cu sârma înfășurată sub tensiune mecanică.

În cazul utilizării tratamentului termic, temperatura maximă nu va depăși 70° C.

Montarea prefabricatelor se face conform proiectului; abaterile de la poziția acestora în plan, de la dimensiunile rosturilor și de la verticalitate trebuie să se înscrie în abaterile limită.

La montare se vor lua măsuri corespunzătoare de sprijinire și fixare a elementelor prefabricate până la monolitizarea rosturilor.

Fetele dinspre rost ale prefabricatelor se sablează sau se perie forțat cu perii de sârmă imediat după decofrare. Înainte de turnarea betonului de monolitizare, fețele dinspre rost se udă pentru a se evita pierderea apei de amestecare din betonul de monolitizare.

La cofrarea rosturilor verticale se interzice folosirea dispozitivelor de fixare a panourilor care să traverseze rostul.

Montarea cofrajelor se va face astfel încât să asigure etanșeitaea.

Betoanele și mortarele turnate în rost nu vor depăși fețele exterioare ale elementelor.

După turnarea și compactarea betonului de monolitizare, zona rostului va fi protejată și udată timp de minimum 7 zile, indiferent de intervalul de timp la care se face decofrarea.

Execuția recipientilor din beton precomprimat cu armătura postîntinsă alcătuită din fascicule înglobate se face în conformitate cu prevederile normativului C 21 – 85.

Ordinea de montare a cofrajelor și armăturilor nepretensionate va fi astfel aleasă încât să permită pozarea ușoară și corectă a tecilor din PVC și a fasciculelor de armătură.

Poziționarea armăturilor postîntinse se va realiza cu ajutorul pieselor metalice fixate de latura dinspre exterior a cofrajului sau folosind carcase metalice speciale (numite scărițe).

Capetele tecilor vor fi protejate cu manșoane (din PVC, tablă) pentru a împiedica pătrunderea laptelui de ciment în timpul betonării și a evita obturarea canalelor.

Pretensionarea fasciculelor se va executa pe inele ce se închid complet pe un cerc orizontal. Excepții de la această prevedere se admit numai cu avizul proiectantului.

Execuția construcțiilor anexe recipientilor va fi corelată cu execuția pereților precomprimați astfel încât să nu fie stânjenite operațiile de pretensionare și injectare, precum și eventuala înlocuire a unor fascicule sau injectarea din alte puncte decât cele prevăzute prin proiect.

Înfășurarea sârmei se va efectua continuu, cu respectarea pasului prescris prin proiect. Distanța medie între spire se va verifica și compensa cel puțin o dată la cinci spire.

La începerea precomprimării prin înfășurare, capătul sârmei se blochează în piese speciale, fixate în acest scop în peretele recipientului. La terminarea unui colac, capetele sârmei se înnădesc prin matisare pe o lungime de 22 cm. Pentru a preveni desfășurarea sârmei în cazul ruperii unei spire, se prevăd, pe sârmă, la distanțe de 500 ... 700 m, piese de prindere a două spire succesive.

La terminarea precomprimării prin înfășurare continuă, se prinde capătul sârmei de spira precedentă cu trei bride, amplasate în locașul pentru măsurarea efortului de pretensionare din sârmă.

Controlul efortului în sârmă, pe durata înfășurării se face cel puțin o dată la două spire, în locașul prevăzut special pe o generatoare a peretelui cilindric. Abaterile de la valoarea efortului de control prescris prin proiect și modul de corectare a efortului vor corespunde specificațiilor de utilizare a mașinii.

Rezultatele privind efortul măsurat se consemnează într-un jurnal în care se notează data și ora măsurării, zona și numărul de ordine al spirei; citirea la aparatul de măsură și valoarea efortului măsurat; efortul nominal, abaterile admise și efective precum și eventualele observații legate de producerea unor incidente (ruperi de sârme, reglarea dispozitivului de pretensionare).

În cazul recipientilor precomprimați, la execuția instalațiilor se vor lua toate măsurile pentru a se evita atingerea armăturilor pretensionate cu surse de temperaturi ridicate (flacăra, material incandescent din sudură). La recipientii precomprimați prin

înfășurare, scara exterioară nu se va prinde în zona armăturilor înfășurate.

În cazul recipientilor protejați anticoroziv, se vor lua toate măsurile pentru a se evita execuția de lucrări, ulterior aplicării protecțiilor.

De asemenea, instalațiile care produc deplasări, șocuri, vibrații (care pot afecta protecțiile anticorozive), vor fi verificate înainte de execuția protecțiilor, astfel ca parametrii ce caracterizează aceste acțiuni să se încadreze între limitele considerate la proiectare.

Execuția tencuielilor se face în conformitate cu prevederile instrucțiunilor tehnice C 130–78 cu următoarele precizări suplimentare:

a) aplicarea tencuielilor se face numai după execuția probei de etanșeitate și a eventualelor remedieri. Se recomandă utilizarea sablării pentru pregătirea suportului tencuielilor, indiferent de modul de aplicare al acestora.

b) aplicarea tencuielilor în zona rosturilor se va face în conformitate cu detaliile de tratare a rosturilor, prevăzute în proiect.

Peste chitul tiocolic proaspăt se recomandă să se stropească cu nisip 1 ... 3 mm pentru a putea prinde o eventuală tencuială.

c) tencuielile pe care se aplică protecții anticorozive se vor drișcui fin.

Tencuielile pe care nu se aplică protecții se vor sclivisi, dacă sunt în contact cu lichidul.

Continuitatea și aderența la stratul suport al șapelor și tencuielilor vor fi verificate prin metode adecvate nedistructive (vizual, ușoară ciocănire, deplasarea pe întreaga suprafață a pietrei de polizare); după efectuarea acestei verificări, se va încheia un **proces verbal de lucrări ascunse**.

Se permite renunțarea la tencuieli în cazul aplicării unor membrane etanșe.

5.4. VERIFICAREA CALITĂȚII LUCRĂRILOR ȘI REMEDIEREA DEFECTELOR DE EXECUȚIE

Verificarea calității lucrărilor se face pe parcursul execuției, pentru fiecare de categorie de lucrări în parte și separat pe recipientul în ansamblu, înainte și după aplicarea straturilor de protecție.

Se recomandă remedierea defectelor vizibile, înainte de verificarea etanșeității, prin operația de injectare sau prin aplicarea unei mase de șpaclu cu chit tiocolic.

La recipientii din BP, se recomandă ca remedierile necesare să se facă înainte de precomprimare.

În cazul utilizării unor membrane etanșe, verificarea etanșeității nu condiționează faza de execuție a precomprimării.

Verificarea etanșeității recipientului se face prin proba de umplere cu apă, conform STAS 4165 – 88.

Instalațiile hidraulice se verifică înaintea umplerii rezervorului cu apă, astfel încât să se evite pierderile de apă prin acestea, care să deformeze rezultatele probei de etanșeitate.

În prima etapă se umple recipientul cu apă până la nivelul corespunzător înălțimii utile și se completează apa astfel încât recipientul să rămână în permanență plin până la nivelul indicat, timp de 10 zile.

În acest interval se fac verificări în vederea eliminării totale a pierderilor de apă prin instalațiile rezervorului sau prin piesele de trecere a conductelor.

Dacă se constată existența unor pierderi de apă la exteriorul pereților, recipientul se golește, se execută reparațiile necesare, fără a mai aștepta trecerea unui interval de 10 zile, reluându-se proba în noile condiții.

În etapa a II – a se face proba de etanșeitate tot pe parcursul a 10 zile.

La începutul acestui interval se închide alimentarea cu apă a recipientului. Etanșeitatea acestuia se consideră corespunzătoare dacă, după trecerea intervalului de 10 zile, pierderile de apă observate, excluzând pierderile prin evaporare, nu depășesc valoarea medie de 0,25 l/zi și m² de suprafață udată.

Se recomandă ca nivelul apei să fie măsurat zilnic, cu precizia de 0,1 mm, constatând, în același timp, tendința de colmatare.

În mod suplimentar, se vor considera și următoarele recomandări:

- umplerea cu apă se va face lent, în minimum 24 de ore;
- la recipientii compartimentați se vor umple la început toate compartimentele, iar verificarea etanșeității pereților se va face prin golire succesivă;
- se va evita menținerea recipientului umplut parțial cu apă timp îndelungat;
- se admit pete mici de umezeală pe pereți în cazul în care aceștia vor fi tencuiți ulterior pe suprafața interioară; în acest caz, pierderea de apă poate fi de maximum 0,50 l/zi și m² de suprafață udată;
- se recomandă o etapă intermediară de verificare a etanșeității radierului cu înălțimea de umplere de maximum 1,0 m;
- la recipientii fundați pe pământuri sensibile la umezire se va efectua, în mod obligatoriu, remedierea prealabilă a defectelor vizibile care ar putea conduce la neetanșeități și se va realiza, în mod obligatoriu, o etapă intermediară de verificare a etanșeității radierului (pentru înălțimea de umplere de maximum 1,0 m);
- în cazul unor pierderi reduse de apă (prin lăcrimări sau pete de umezeală) se va mări etanșeitățile cu ajutorul unei suspensii de argilă sau de ciment în apă.

Verificarea finală a etanșeității se face după aplicarea tencuielilor și a straturilor de protecție. Proba se face prin umplerea recipientului cu apă și se consideră satisfăcătoare dacă nu apar pete la exterior.

Denivelările, zonele de beton segregat, zonele cu armături descoperite sau cu acoperire insuficientă și cele necompletate cu beton se remediază conform instrucțiunilor tehnice C 149 - 87.

În vecinătatea pieselor de trecere se recomandă ca remedierile să se facă prin injectare cu lapte de ciment sau cu amestecuri pe bază de rășini epoxidice; soluția va fi stabilită în urma analizării cauzelor care au determinat apariția unor fisuri.

Se va avea în vedere compatibilitatea materialelor utilizate pentru remedieri cu lichidele înmagazinate.

5.5. DATE ȘI CONDIȚII CE TREBUIE SPECIFICATE PE PLANȘE ȘI ÎN CAIETUL DE SARCINI

În planșele din proiectele de execuție și în caietul de sarcini trebuie detaliate **calitățile materialelor utilizate**:

- betonul, caracterizat conform precizărilor din Anexa I.2 din Normativul C 140 – 86, inclusiv gradul de impermeabilitate și gelivitate;

- armăturile nepretensionate;
- armătura pretensionată și tipul de ancoraj;
- piesele metalice înglobate;
- garnituri și materiale pentru etanșare;
- materiale pentru protecții hidrofuge, termice, anticorozive.

În caietul de sarcini se precizează:

1) condiții privind calitatea materialelor, încercări și măsurători pentru recepție;

2) abateri admise la execuție;

3) eșalonarea lucrărilor și precizări privind ordinea operațiilor;

4) detalii pentru poziționarea armăturilor pretensionate și nepretensionate; date privind efortul de control din armăturile pretensionate, abaterile maxime admise, metode de verificare, definitivarea programului de pretensionare pe baza pierderilor reale de tensiune, stabilite pe șantier;

5) tehnologia de punere în operă, vibrare și tratare a betonului pe durata întăririi;

6) măsuri pentru reducerea eforturilor din contracție;

7) rezistența betonului la decofrare, transfer și clasa betonului;

8) gradul de impermeabilitate și gelivitate a betonului;

9) în cazul utilizării elementelor prefabricate:

- modul de tratare a fețelor de contact în rost;
- modul de umplere a rosturilor;
- rezistența microbetonului de monolitizare în timpul precomprimării;

- alte caracteristici ale microbetonului din rosturi.

10) obligativitatea și condițiile de recepție pe faze a lucrărilor, cu specificarea fazelor de execuție la care este obligatorie prezența proiectantului;

11) măsurile necesare pentru asigurarea protecției armăturilor pretensionate în limita termenelor prescrise;

12) măsurile și condițiile necesare pentru realizarea protecției anticorozive, izolațiilor hidrofuge și termice;

13) programul detaliat al probei de etanșeitate și scăderea admisibilă a nivelului apei, în mm, ținând seama de suprafața udată efectivă a recipientului;

14) asigurarea măsurilor necesare pentru efectuarea probei de etanșeitate (instalații de alimentare și evacuare a apei);

15) măsuri speciale de protecție a muncii pe durata execuției.

Capitolul 6

ELEMENTE PRIVIND CALCULUL STATIC ȘI DINAMIC/SEISMIC AL REZERVOARELOR CILINDRICE

În cele ce urmează se vor prezenta metode expeditiv de calcul, utile în proiectarea rezervoarelor cilindrice de mică capacitate (sub 300 m^3) din beton armat, respectiv metode analitice, exacte, abordarea calculului cu metoda generală a elementelor finite urmând a fi realizată în volumul III. Se detaliază (prin traducere directă) calculul static la încărcări orizontale nesimetrice prezentat în /3/.

Calculul seismic se bazează pe modele dinamice simplificate, insistându-se asupra determinării acțiunilor seismice orizontale și a suprapresiunilor hidrodinamice asociate.

Rezervoarele cu secțiune circulară se execută de obicei cu pereți verticali, fiind mai economice decât rezervoarele dreptunghiulare, deoarece pereții sunt acționați mai ales la forța axială inelară și nu de momente de încovoiere mari ca în cazul rezervoarelor dreptunghiulare.

La rezervoarele mai mari, cu diametre între 5 și 30 m, acoperișul se execută sub forma unei cupole, de obicei sferice (fig. 6.1); aceasta poate fi legată monolit de perete sau "rezemată liber" pe acesta. În ambele cazuri, în calcul, la eforturile stării de membrană se adaugă eforturile care apar datorită perturbării stării de membrană, provocată de legătura monolită cu peretele sau cu grinda inelară superioară pe care reazemă cupola.

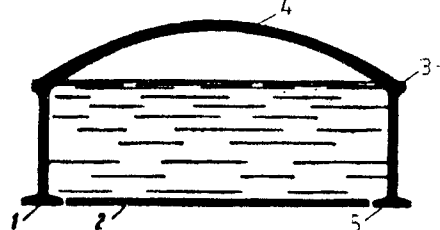


Fig. 6.1

Alcătuirea de principiu a rezervoarelor cilindrice mici și medii:

- 1 – grîndă inelară de fundație;
- 2 – placă circulară;
- 3 – grîndă inelară superioară;
- 4 – cupolă sferică;
- 5 – rost elastic.

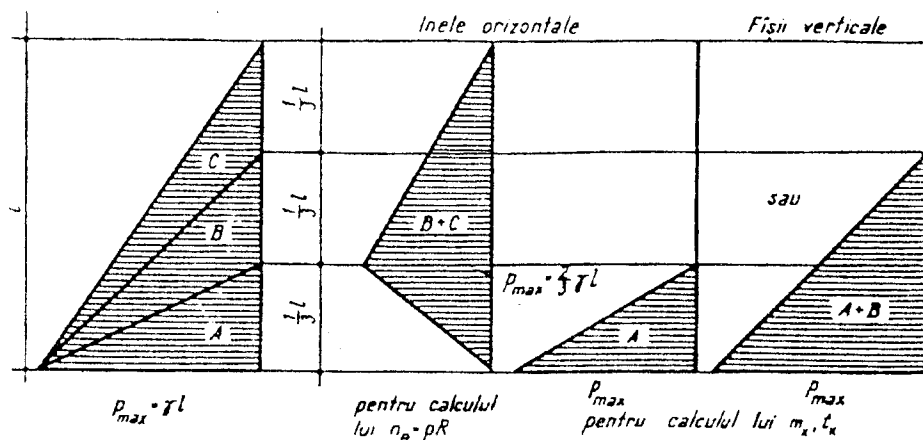


Fig. 6.2

Schema de distribuție a presiunilor hidrostatice interioare la inelele orizontale și fâșiile verticale în metoda aproximativă de calcul.

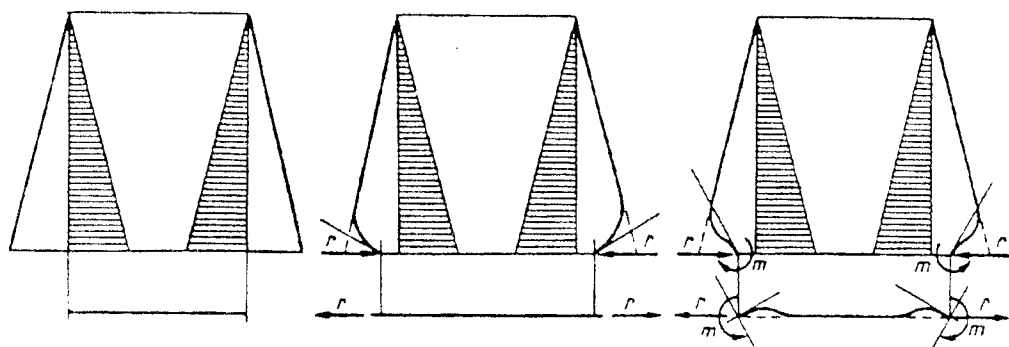


Fig. 6.3

Sisteme de bază în calcul static al rezervoarelor cilindrice:

- a – cu peretele articular în radier;
- b – cu peretele încastrat în radier.

Calculul se efectuează la acțiuni statice și dinamice/seismice, ținând seama de interacțiunea lichid–structură, utilizând metode aproximative sau exacte de calcul.

6.1. METODE APROXIMATIVE DE CALCUL

În cazul rezervoarelor mici, cu diametrul până la 5 m, acoperișul și radierul se pot executa sub forma unor plăci plane circulare. Calculul acestor plăci este prezentat în diferite lucrări și evidențiază momentele încovoietoare radiale și tangențiale, respectiv deplasările verticale și rotațiile în secțiuni caracteristice, funcție de modul concret de legătură cu peretele cilindric.

La limită, pereții cilindrici pot fi calculați fără a se ține seama de legătura cu acoperișul și radierul, determinându-se numai efortul inelar $n_{\theta} = p \cdot R$, p fiind presiunea apei/fluidului sau împingerea pământului la nivelul considerat, iar R raza rezervorului.

La rezervoarele cilindrice de mică capacitate, la care raportul între rază și înălțime prezintă valori de 0,5 ... 2,0, calculul pereților se poate face cu următoarea metodă aproximativă.

Presiunea apei se descompune în două părți, din care una încarcă inelele orizontale și cealaltă fâșiile verticale separate din rezervor. În acest scop, diagrama presiunilor interioare se împarte în trei părți egale notate A, B și C, care se grupează în diagrama B+C de încărcare a inelelor orizontale și diagrama A, de încărcare a fâșiilor verticale.

În mod acoperitor presiunea repartizată fâșiilor verticale poate fi sporită prin încărcarea acestora cu diagrama A+B, prin aceasta acoperindu-se imperfecțiunea calculului (fig. 6.2).

Efortul axial maxim (de întindere sub acțiunea presiunii interioare a fluidului) în inele, $n_{\theta \max}$, care solicită secțiunea verticală a peretelui $\delta \times 100$, se produce la 1/3 din înălțimea rezervorului măsurată de la baza acestuia; prin δ se desemnează grosimea peretelui cilindric.

Pentru a determina momentele încovoietoare m_x , care acționează secțiunile orizontale $100 \times \delta$, se consideră că fâșiile

verticale sunt încastrate în radier, sau dacă rezervorul este acoperit, încastrate în radier și simplu rezemate la nivelul acoperișului.

6.2. METODE ANALITICE EXACTE DE CALCUL

În cazul rezervoarelor cu capacități relativ mici și al terenurilor bune de fundație radierul acestora se execută sub forma unor plăci plane circulare.

Dacă subpresiunea apei prezintă valori reduse și terenul de fundație este foarte bun, peretele cilindric poate fi dispus pe o grindă inelară separată de placa circulară de bază, placa fiind armată din considerente constructive.

Această opțiune este justificată de faptul că greutatea proprie a plăcii și greutatea apei nu produc momente încovoietoare în placa de bază.

Dacă terenul de fundație este slab iar subpresiunea apei prezintă valori semnificative, radierul se poate executa sub forma unei cupole răsturnate.

Rezervoarele cilindrice mari, cu diametre peste 30 m, sunt prevăzute cu stâlpi intermediari astfel încât acoperișul și radierul se transformă în planșee ciupercă, în cazul variantei monolite, respectiv într-o rețea inelară de stâlpi interiori prefabricați (în fundații de tip pahar) și grinzi circulare pe capetele acestora, ce susțin elemente prefabricate (cu secțiuni transversale în formă de T, cu lățimea plăcii variabilă) din beton armat sau beton precomprimat.

Această soluție se folosește și în cazul rezervoarelor cu diametrul sub 30 m, dacă înălțimea construcției este limitată și nu se pot executa cupole de acoperiș.

În **teoria elastică exactă**, pereții cilindrici ai rezervoarelor mari se calculează la acțiunea presiunii apei, respectiv a împingerii pământului, în regim static, respectiv la forțele seismice convenționale, definite pentru amplasamentul respectiv. Deoarece încărcările nu sunt axial simetrice, iar legăturile reale între pereți și acoperiș sau radier perturbă starea de membrană, în pereți iau naștere următoarele eforturi secționale: n_x , n_θ , n_{x0} , m_x , m_θ , m_{x0} , t_x și t_θ .

Presiunea apei în regim static fiind axial simetrică, rămân de calculat eforturile normale n_x și n_θ , momentul de încovoiere m_x și forța tăietoare t_x .

Problema determinării acestor eforturi este static nedeterminată, deoarece forțele necesare pentru asigurarea continuității deformației la contactul perete - acoperiș, respectiv perete - radier, nu se pot determina din ecuații de echilibru static.

În **cazul rezervoarelor înalte**, perturbările stării de eforturi de membrană în perete datorită legăturilor acestuia cu acoperișul, respectiv cu radierul, nu se extind până la marginile opuse, astfel încât efectele acestor legături pot fi studiate independent.

Calculul peretelui cilindric încastrat în radier, articulat sau rezemat astfel încât să se poată deplasa limitat, sub acțiunea presiunii apei, se poate efectua cu ajutorul metodei eforturilor/forțelor.

Sistemul de bază în metoda forțelor se obține prin secționarea peretelui la nivelul legăturii cu placa de bază (fig. 6.3), evidențiind eforturile respective.

Pentru ca sub acțiunea presiunii apei marginea inferioară a peretelui și conturul plăcii de bază să aibă aceleași deformații, în vederea asigurării continuității geometrice, asupra lor trebuie să acționeze o **forță orizontală radială r** și un **moment încovoiator m** , uniform distribuite pe circumferință.

Acestea sunt necunoscutele static nedeterminate, care se obțin prin procedeul cunoscut din statica sistemelor de bare.

Practic, se calculează eforturile inelare n_θ produse în sistemul de bază de către încărcarea exterioară, respectiv eforturile axiale $n_r = 1$ și $n_m = 1$ produse de către necunoscutele unitare.

Încărcarea din presiunea apei satisface condițiile stării de membrană, în timp ce necunoscutele r și m nu satisfac aceste condiții și de aceea se apelează la **teoria de încovoiere** a plăcilor cilindrice.

Mărimile necunoscutele se determină pe baza condițiilor de continuitate, iar eforturile inelare finale se obțin cu relații de forma:

$$(6.1) \quad n = n_\theta + r \cdot n_r = 1 + m \cdot n_m = 1.$$

În **cazul peretelui cilindric simplu rezemat**, acțiunea încărcării exterioare (presiunea apei; împingerea terenului) se studiază în **teoria de membrană**.

În baza considerațiilor geometrice simple din fig. 6.4, se poate scrie:

$$(6.2) \quad \Sigma Z = 0; \quad n_{\theta 0} = \gamma(l-x)R = pR;$$

$$(6.3) \quad \varepsilon_y = \frac{(R+w_0)d\theta - Rd\theta}{Rd\theta} = \frac{w_0}{R}; \quad w_0 = \varepsilon_y R = \frac{n_{\theta 0} R}{E\delta};$$

rezultă:

$$(6.4) \quad w_0 = \frac{R^2}{E\delta} \gamma(l-x); \quad \chi_0 = \frac{dw_0}{dx} = -\frac{R^2}{E\delta} \gamma.$$

Pentru determinarea acțiunii necunoscutele static nedeterminate r și m asupra plăcii cilindrice se deduc mai întâi expresiile eforturilor și deformațiilor cilindrului de **grosime constantă** încărcat marginal axial simetric, în **teoria de încovoiere**.

Ecuatiile de echilibru pentru un element diferențial pot fi stabilite în baza datelor din fig. 6.5:

$$(6.5) \quad \Sigma X = 0: \quad \frac{dn_x}{dx} = 0;$$

$$(6.6) \quad \Sigma Y = 0: \quad \text{identitate};$$

$$(6.7) \quad \Sigma Z = 0: \quad n_{\theta} + R \frac{dt_x}{dx} = 0;$$

$$(6.8) \quad (\Sigma M)_x = 0, \quad (\Sigma M)_z = 0; \quad \text{identități};$$

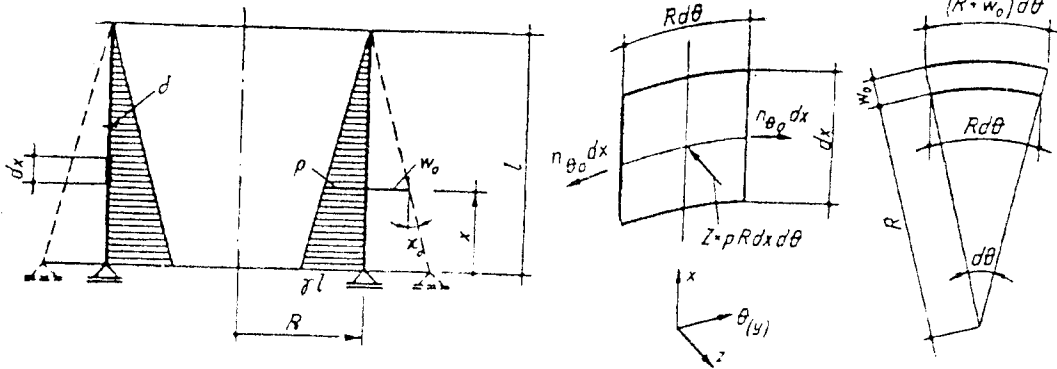


Fig. 6.4 Perete cilindric simplu rezemat pe radier și eforturi/deformații în teoria de membrană.

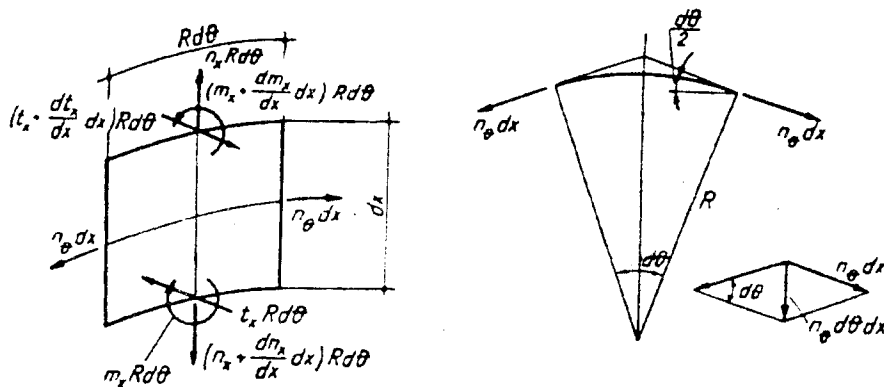


Fig. 6.5 Eforturile stării de încovoiere la un perete cilindric circular.

$$(6.9) \quad (\Sigma M)_y = 0: \quad \frac{dm_x}{dx} = t_x.$$

Având numai trei ecuații semnificative de echilibru pentru cele patru necunoscute n_x , n_θ , m_x și t_x , se utilizează **ecuația de deformare**:

$$(6.10) \quad \varepsilon_y = \frac{w}{R}.$$

Relațiile între eforturi și deplasări devin:

$$(6.11) \quad n_\theta = \frac{w}{R} E \delta;$$

$$(6.12) \quad m_x = D \frac{d^2 w}{dx^2},$$

în care $D = \frac{E \delta^3}{12(1-\mu^2)}$ reprezintă **rigiditatea cilindrică a plăcii**.

Din ecuația (6.5) rezultă prin integrare efortul n_x .
Introducând relația (6.9) în (6.7) se obține:

$$(6.13) \quad n_\theta + R \frac{d^2 m_x}{dx^2} = 0.$$

Ținând seama de (6.11) și (6.12) rezultă:

$$(6.14) \quad \frac{d^4 w}{dx^4} + \frac{E \delta}{R^2 D} w = 0.$$

Dacă se acceptă notația $\lambda = \sqrt[4]{\frac{E \delta}{4 R^2 D}} = \sqrt[4]{\frac{3(1-\mu^2)}{R^2 \delta^2}}$, ecuația diferențială precedentă devine:

$$(6.15) \quad \frac{d^4 w}{dx^4} + 4 \lambda^4 w = 0.$$

Soluția acestei ecuații este de forma:

$$(6.16) \quad w = e^{-\lambda x} (C_1 \cos \lambda x + C_2 \sin \lambda x) + e^{\lambda x} (C_3 \cos \lambda x + C_4 \sin \lambda x) = w_1 + w_2.$$

Termenul w_1 se amortizează cu creșterea valorii lui x de la marginea inferioară, iar w_2 în sens invers, de la marginea superioară.

Dacă se reține numai termenul w_1 (fig. 6.6), soluția ecuației devine:

$$(6.17) \quad w = e^{-\lambda x} (C_1 \cos \lambda x + C_2 \sin \lambda x).$$

Înlocuind această valoare în relațiile (6.11), (6.12) și (6.9) se evidențiază expresiile celorlalte eforturi:

$$(6.18) \quad n_\theta = \frac{E \delta}{R} w = \frac{E \delta}{R} e^{-\lambda x} (C_1 \cos \lambda x + C_2 \sin \lambda x);$$

$$(6.19) \quad m_x = D \frac{d^2 w}{dx^2} = 2 D \lambda^2 e^{-\lambda x} (C_1 \sin \lambda x - C_2 \cos \lambda x);$$

$$(6.20) \quad t_x = D \frac{d^3 w}{dx^3} = 2 D \lambda^3 e^{-\lambda x} [(C_1 + C_2) \cos \lambda x - (C_1 - C_2) \sin \lambda x]$$

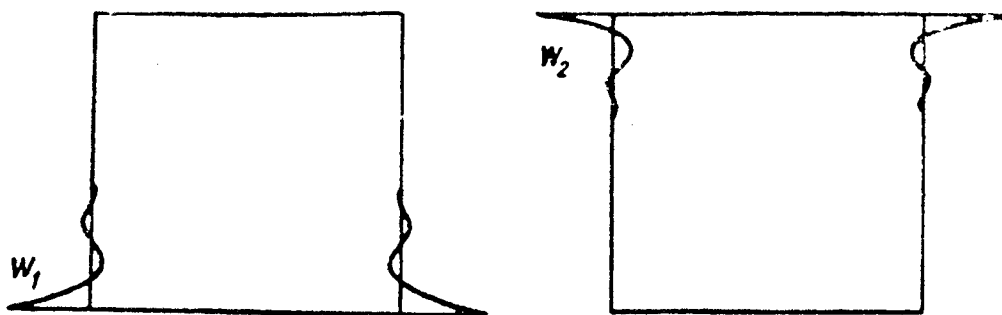


Fig. 6.6 Amortizarea deplasărilor radiale pe înălțimea peretelui cilindric înalt.

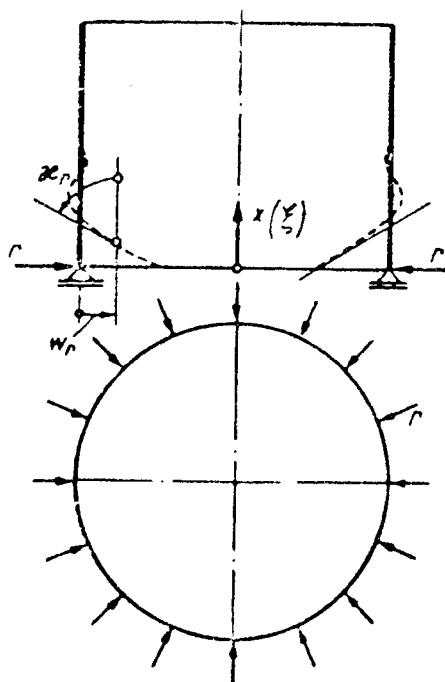


Fig. 6.7 Efectul reacțiunii radiale "r".

Constantele de integrare se determină pentru acțiunea necunoscutelor r și respectiv m .

În cazul marginii inferioare încărcate cu forța radială uniform distribuită r , condițiile de margine (fig. 6.7) capătă forma:

$$(t_x)_{x=0} = -r; \quad (m_x)_{x=0} = 0;$$

rezultă:

$$C_1 = -\frac{r}{2D\lambda^3} \quad C_2 = 0. \quad (6.21)$$

Relațiile pentru determinarea eforturilor și deplasărilor devin:

$$(6.22) \quad n_{\theta} = -\frac{r}{2D\lambda^3} \frac{E\delta}{R} e^{-\lambda x} \cos \lambda x;$$

$$(6.23) \quad m_{xr} = -\frac{r}{\lambda} e^{-\lambda x} \sin \lambda x;$$

$$(6.24) \quad t_{xr} = -r e^{-\lambda x} (\cos \lambda x - \sin \lambda x);$$

$$(6.25) \quad w_r = -\frac{r}{2D\lambda^3} e^{-\lambda x} \cos \lambda x;$$

$$(6.26) \quad \chi_r = \frac{dw_r}{dx} = \frac{r}{2D\lambda^2} e^{-\lambda x} (\cos \lambda x + \sin \lambda x).$$

În cazul betonului armat se poate considera aproximativ $\mu = 0$. Introducând notațiile:

$$(6.27) \quad b = \frac{1}{\lambda} = \sqrt{\frac{R\delta}{\sqrt{3}}}, \quad \xi = \frac{x}{b},$$

relațiile anterioare capătă forma:

$$(6.28) \quad n_{\theta} = \frac{b}{\delta} r \left(-2\sqrt{3}e^{-\xi} \cos \xi \right) = \frac{b}{\delta} r \cdot k_1(\xi),$$

$$(6.29) \quad m_{xr} = br \left(-e^{-\xi} \sin \xi \right) = br \cdot k_2(\xi),$$

$$(6.30) \quad t_{xr} = r \left[-e^{-\xi} (\cos \xi - \sin \xi) \right] = r \cdot k_3(\xi),$$

$$(6.31) \quad Dw_r = b^3 r \left(-\frac{1}{2} e^{-\xi} \cos \xi \right) = b^3 r \cdot k_4(\xi),$$

$$(6.32) \quad D\chi_r = b^2 r \left[\frac{1}{2} e^{-\xi} (\sin \xi + \cos \xi) \right] = b^2 r \cdot k_5(\xi).$$

Pentru calculele practice, coeficienții $k_1(\xi) \dots k_5(\xi)$ sunt prezentați în anexa 6.1. după [1].

În anexa 6.3 sunt dați coeficienții $\bar{k}_1(\xi) \dots \bar{k}_5(\xi)$ corespunzători cazului în care încărcarea radială r este aplicată la marginea superioară a peretelui cilindric.

În cazul marginii inferioare încărcate cu un moment încovoiator uniform distribuit m , condițiile de margine devin (fig. 6.8):

$$(m_x)_{x=0} = m; \quad (t_x)_{x=0} = 0,$$

astfel că rezultă:

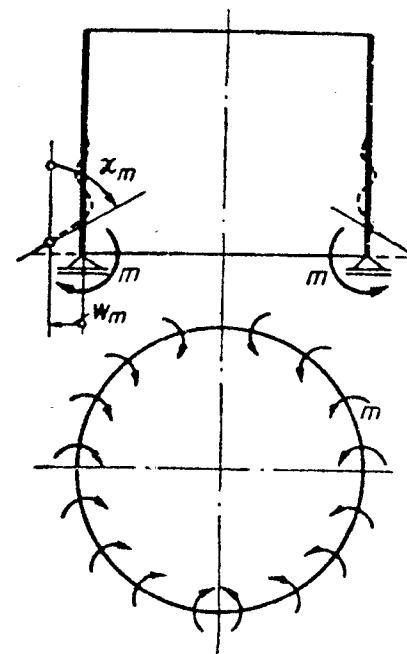
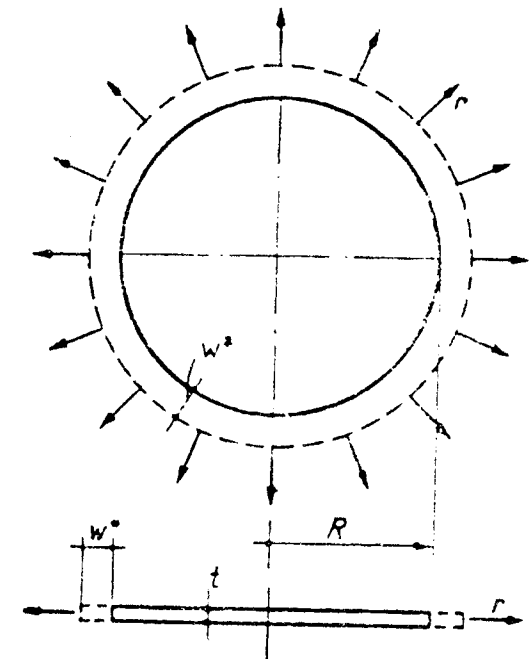


Fig. 6.8
Efectul reacțiunii moment încovoiator uniform distribuit "m" la contactul perete cilindric – radier.

Fig. 6.9
Starea de deformare radială a plăcii de bază sub acțiunea "r".



$$(6.33) \quad C_1 = \frac{m}{2D\lambda^2}, \quad C_2 = -\frac{m}{2D\lambda^2}.$$

Eforturile și deplasările corespunzătoare se calculează cu relațiile:

$$(6.34) \quad n_{\theta m} = \frac{m}{2D\lambda^2} \frac{E\delta}{R} e^{-\lambda x} (\cos \lambda x - \sin \lambda x),$$

$$(6.35) \quad m_{xm} = m e^{-\lambda x} (\sin \lambda x) + \cos \lambda x;$$

$$(6.36) \quad t_{xm} = -2m\lambda e^{-\lambda x} \sin \lambda x;$$

$$(6.37) \quad w_m = \frac{m}{2D\lambda^2} e^{-\lambda x} (\cos \lambda x - \sin \lambda x),$$

$$(6.38) \quad \chi_m = \frac{dw_m}{dx} = -\frac{m}{D\lambda} e^{-\lambda x} \cos \lambda x;$$

ținând seama de notațiile (6.27), relațiile anterioare capătă formele implicite:

$$(6.39) \quad n_{\theta m} = \frac{1}{\delta} m \cdot f_1(\xi)$$

$$(6.40) \quad m_{xm} = m \cdot f_2(\xi)$$

$$(6.41) \quad t_{xm} = \frac{1}{b} m \cdot f_3(\xi)$$

$$(6.42) \quad Dw_m = b^2 m \cdot f_4(\xi)$$

$$(6.43) \quad D\chi_m = bm \cdot f_5(\xi)$$

Coeficienții $f_1(\xi) \dots f_5(\xi)$ sunt dați în anexa 6.2., iar în anexa 6.4 sunt evidențiați coeficienții $\bar{f}_1(\xi) \dots \bar{f}_5(\xi)$ pentru cazul marginii superioare încărcate cu un moment încovoietor distribuit $\bar{m}$.

La solicitarea de încovoiere, **placa de bază circulară** poate fi considerată elastică sau rigidă față de peretele rezervorului.

De asemenea, deplasarea radială a acestei plăci sub acțiunea distribuită r poate fi neglijată, placa considerându-se rigidă la eforturi normale.

În cazul general al unei plăci elastice la eforturi normale și la încovoiere, încărcarea marginală r produce alungiri specifice radiale, care pot fi estimate prin:

$$(6.44) \quad \varepsilon_r = \frac{r}{Et} (1 - \mu)$$

Deplasările radiale (fig. 6.9) devin:

$$(6.45) \quad w^* = R\varepsilon_r = \frac{Rr}{Et} (1 - \mu).$$

Sub acțiunea momentului marginal uniform distribuit m , marginea plăcii se desprinde de pe solul rigid pe o lățime L (fig. 6.10).

Deoarece L este mic în comparație cu raza R , deformația plăcii poate fi calculată cu ajutorul unei metode aproximative. Astfel, placa se consideră divizată prin secțiuni radiale în fâșii cu lățime unitară la margine.

Se poate admite că lățimea fâșiilor izolate este egală cu unitatea.

Considerând aceste fâșii simplu rezemate și încărcate ca în figura 6.10, mărimea L se obține din condiția existenței unei tangente orizontale în punctul B .

Folosind metoda grinzii conjugate se obține:

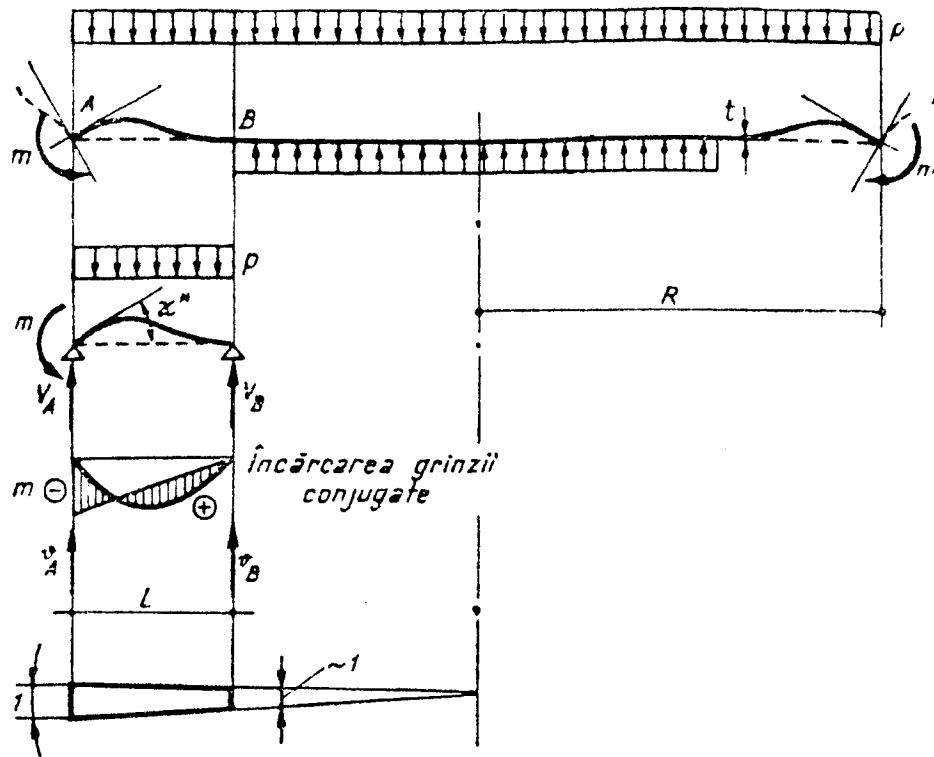


Fig. 6.10 Starea de deformare prin încovoiere a plăcii de bază (efectul momentului uniform distribuit "m").

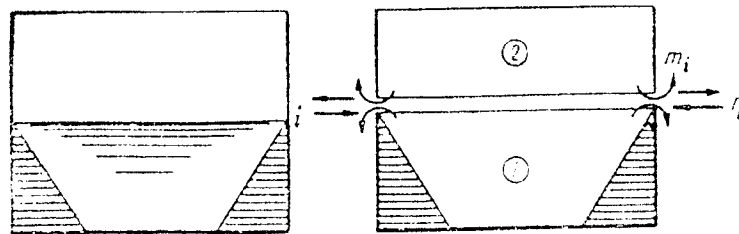


Fig. 6.12 Alegerea sistemului de bază în cazul umplerii parțiale a rezervorului cilindric.

$$(6.46) \quad \text{El} v_B = 0 = \frac{pL^3}{24} - \frac{1}{3} \cdot \frac{1}{2} mL = \frac{pL^3}{24} - \frac{mL}{6},$$

de unde rezultă lungimea fâșiei:

$$(6.47) \quad L = 2 \sqrt{\frac{m}{p}}.$$

Determinarea rotirii capătului A se face cu relația:

$$(6.48) \quad \text{El} \chi^* = \text{El} v_A = \frac{pL^3}{24} - \frac{mL}{3} = \frac{1}{3} \sqrt{\frac{m^3}{p}} - \frac{2}{3} \sqrt{\frac{m^3}{p}} = -\frac{1}{3} \sqrt{\frac{m^3}{p}}.$$

Ținând seama că $I = \frac{t^3}{12(1-\mu^2)}$ rezultă:

$$(6.49) \quad \chi^* = \frac{4(1-\mu^2)}{Et^3} \sqrt{\frac{m^3}{p}}.$$

Condițiile de margine pentru **determinarea reacțiilor r și m** (condițiile de continuitate) sunt:

$$(6.50) \quad (w_0 + w_r + w_m)_{x=0} = w^*,$$

$$(6.51) \quad (\chi_0 + \chi_r + \chi_m)_{x=0} = \chi^*;$$

rezultă:

$$(6.52) \quad \frac{R^2}{E\delta} \gamma \cdot l - \frac{1}{2D\lambda^3} r + \frac{1}{2D\lambda^2} m = \frac{R(1-\mu)}{Et} r;$$

$$(6.53) \quad -\frac{R^2}{E\delta} \gamma + \frac{1}{2D\lambda^2} r - \frac{1}{D\lambda} m = \frac{4(1-\mu^2)}{Et^3} \sqrt{\frac{m^3}{p}}.$$

Prin rezolvarea acestui sistem de ecuații se obțin valorile r și m .

Trebuie menționat faptul că acest mod de rezolvare poate fi folosit numai dacă rezervorul este *înnalt*, deci perturbările ce pornesc de la o margine se amortizează până la marginea opusă.

Analizând anexele 6.1 ... 6.4 se observă că amortizarea are loc pentru $\xi = l/b = \lambda \cdot l \geq 4$.

În cazul rezervoarelor *joase* (caracterizate prin $l/b < 4$) trebuie studiată influența reciprocă a reacțiunilor r , m , respectiv $\bar{r}$, $\bar{m}$.

Mărimile acestor necunoscute rezultă din cele patru condiții de margine corespunzătoare, scrise cu ajutorul valorilor din anexele 6.1 ... 6.4.

Abaca prezentată în anexa 6.8 permite determinarea cu ușurință a reacțiunilor r și m în cazul rezervoarelor înalte cu **placa de bază elastică** (peretele este încastrat elastic în placa de bază).

Dacă **placa de bază este rigidă**, atât la încovoiere cât și la eforturi normale și peretele este încastrat în radier, sistemul de ecuații pentru determinarea lui r și m devine:

$$(6.54) \quad \frac{R^2}{E\delta} \gamma \cdot l - \frac{1}{2D\lambda^3} r + \frac{1}{2D\lambda^2} m = 0;$$

$$(6.55) \quad -\frac{R^2}{E\delta} \gamma + \frac{1}{2D\lambda^2} r - \frac{1}{D\lambda} m = 0;$$

necunoscutele static nedeterminate devin:

$$(6.56) \quad r = 2R^2 \lambda^2 \gamma \frac{D}{E\delta} (2\lambda \cdot l - 1) = \frac{1}{2} b^2 \gamma \left(2 \frac{l}{b} - 1 \right);$$

$$(6.57) \quad m = 2R^2 \lambda \gamma \frac{D}{E\delta} (\lambda \cdot l - 1) = \frac{1}{2} b^3 \gamma \left(\frac{l}{b} - 1 \right).$$

În anexele 6.6 și 6.7 se evidențiază expresiile lui r și m pentru rezervoare cu pereți încastrați sau articulați de placa de bază cât și pentru alte elemente legate de pereți (de exemplu, consolă perimetrală la partea superioară a peretelui cilindric) și alte încărcări decât presiunea apei.

Valorile finale ale eforturilor și deplasărilor se obțin prin superpoziția valorilor stării de membrană pe cele din acțiunea lui r și m , rezultând:

$$(6.58) \quad n_\theta = n_{\theta 0} + n_{\theta r} + n_{\theta m} + \bar{n}_{\theta r} + \bar{n}_{\theta m}, \quad m_x = m_{xr} + m_{xm} + \bar{m}_{xr} + \bar{m}_{xm}$$

$$(6.59) \quad w = w_0 + w_r + w_m + \bar{w}_r + \bar{w}_m.$$

În anexa 6.10 se evidențiază eforturile și deplasările în **starea de membrană**. Pentru rezervorul neacoperit, cu peretele încastrat într-o placă de bază rigidă, pe baza expresiilor lui r și m date mai sus de (6.56) și (6.57), utilizând relația (6.58), se obțin:

$$(6.60) \quad n_\theta = R\gamma \left\{ (l-x) - e^{-\lambda x} \cdot l \left[\cos \lambda x + \left(1 - \frac{1}{\lambda l} \right) \sin \lambda x \right] \right\}$$

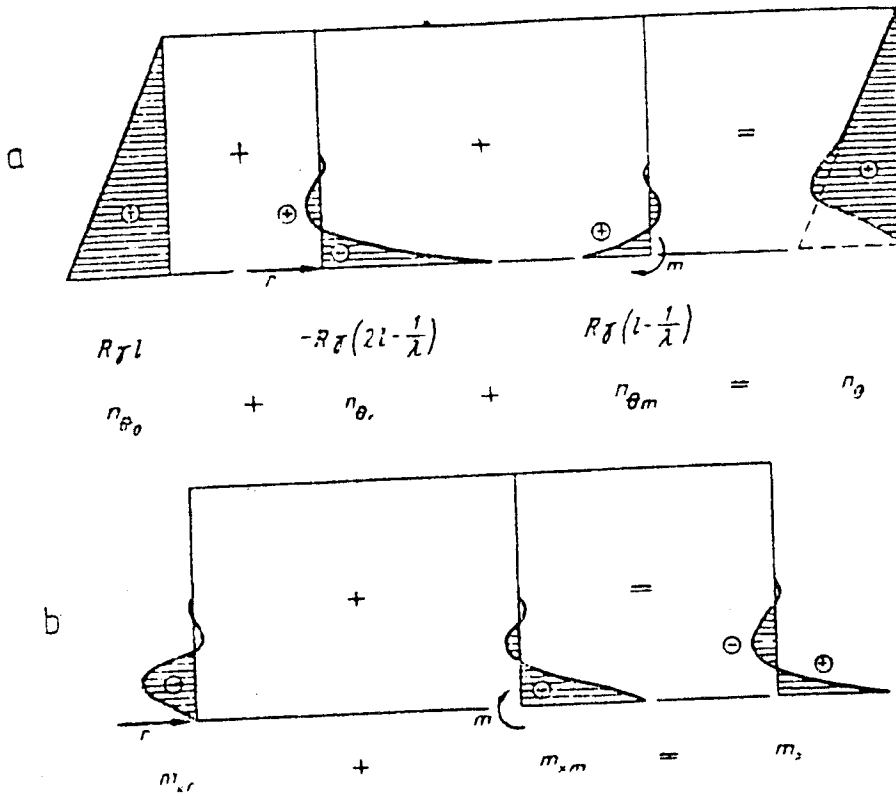


Fig. 6.11 Suprapunerea eforturilor secționale în calculul rezervoarelor cilindrice circulare:
 a – inelare/axiale (n_{θ});
 b – de încovoiere (m_x).

$$(6.61) \quad m_x = 2R^2 \lambda^2 \gamma \cdot l \frac{D}{E\delta} e^{-\lambda x} \left[\left(1 - \frac{1}{\lambda l} \right) \cos \lambda x - \sin \lambda x \right]$$

Rezultatul compunerii eforturilor poate fi urmărit în figura 6.11.

Abacele date în diferite lucrări permit determinarea rapidă a elementelor caracteristice ale diagramelor de eforturi (valorile eforturilor maxime, pozițiile secțiunilor de efort maxim, respectiv de efort zero) pentru rezervoare umplute cu lichide, având pereții încastrați rigid, elastic sau articulați în radier.

Dacă **rezervorul este umplut parțial**, nu se mai poate folosi sistemul de bază din figura 6.3, deoarece încărcarea nu satisface condițiile stării de membrană.

Sistemul de bază se alege static nedeterminat, conform celor prezentate în fig. 6.12.

Partea inferioară a sistemului de bază se calculează ca mai sus, iar partea superioară se consideră acționată numai de necunoscutele r și m .

Valoarea acestora rezultă din condiția de egalitate a deplasărilor radiale $w_{1i} = w_{2i}$ și a rotirilor, $\chi_{1i} = \chi_{2i}$, în secțiunea orizontală de la nivelul i .

La eforturile și deplasările calculate anterior pentru sistemul de bază se suprapun eforturile deplasării datorită lui r_i și m_i .

În cazul rezervoarelor precomprimate prezintă interes efectul instantaneu al pretensionării unui inel de armătură (alcătuit din segmente ancorate în nervuri verticale), respectiv eforturile secționale corespunzătoare (linii de influență pentru precomprimarea inelară – anexa 6.9).

Pentru a evidenția jocul de eforturi secționale care apare la pretensionarea inelelor de armătură de înaltă rezistență (la precomprimarea inelelor de beton armat) se pot folosi liniile de influență pentru peretele cilindric încastrat în radier (anexa 6.9.1 și anexa 6.9.2, pentru eforturile n_{θ} și m_x), respectiv articulat de radier (anexa 6.9.3 și anexa 6.9.4).

6.3. CALCULUL SEISMIC SIMPLIFICAT AL REZERVOARELOR CILINDRICE

Construcțiile de înmagazinare a apei prezintă o sensibilitate sporită la cutremur, ca urmare a solicitărilor dinamice suplimentare induse de apa din interior, fiind cunoscute numeroase cazuri de avarii și distrugeri suferite de aceste construcții speciale în timpul cutremurelor majore.

O inventariere a avariilor constatate la rezervoarele de apă la cutremurele japoneze cele mai puternice a fost efectuată de către S. Okamoto [4].

La cutremurul *Kanto* (1923, cu magnitudinea $M = 8,16$), două rezervoare din sistemul de alimentare cu apă a orașului Tokyo au fost scoase din funcțiune ca urmare a fisurării radierelor și pereților de compartimentare și a ruperii conductelor, la intrarea în compartimentul camerei vanelor.

La cutremurul *Fukui* (1948, $M = 7,2$) rezervoarele ce deserveau orașele Maruoka și Fukui au suferit avarii grave prin alunecarea pe fundație și tasarea fundației, însoțite de fisurarea pereților transversali.

La cutremurul *Niigata* (1964, $M = 7,5$) o serie de construcții speciale din sistemul de alimentare și epurare a apei pentru orașul *Niigata* au fost scoase din funcțiune ca urmare a ruperii, înclinării sau tasării excesive a construcțiilor, fondate pe terenuri care s-au lichefiat.

În figurile 6.14 și 6.15 sunt evidențiate tipuri de avarii care apar la construcțiile de înmagazinare a apei, amplasate în zone seismice semnificative.

În primul caz avarierea constă în ruperea radierului în urma lichefierii terenului de fundare.

Avarii asemănătoare au suferit și rezervoarele de apă ale orașului Aomari la cutremurul *Tokachi* (1968, $M = 7,9$).

O serie de avarieri grave ale rezervoarelor au fost semnalate în urma cutremurelor de pe coasta vestică a S.U.A. La cutremurul *Alaska*, în zona Anchorage, din 21 de rezervoare numai 4 au mai rămas în exploatare.

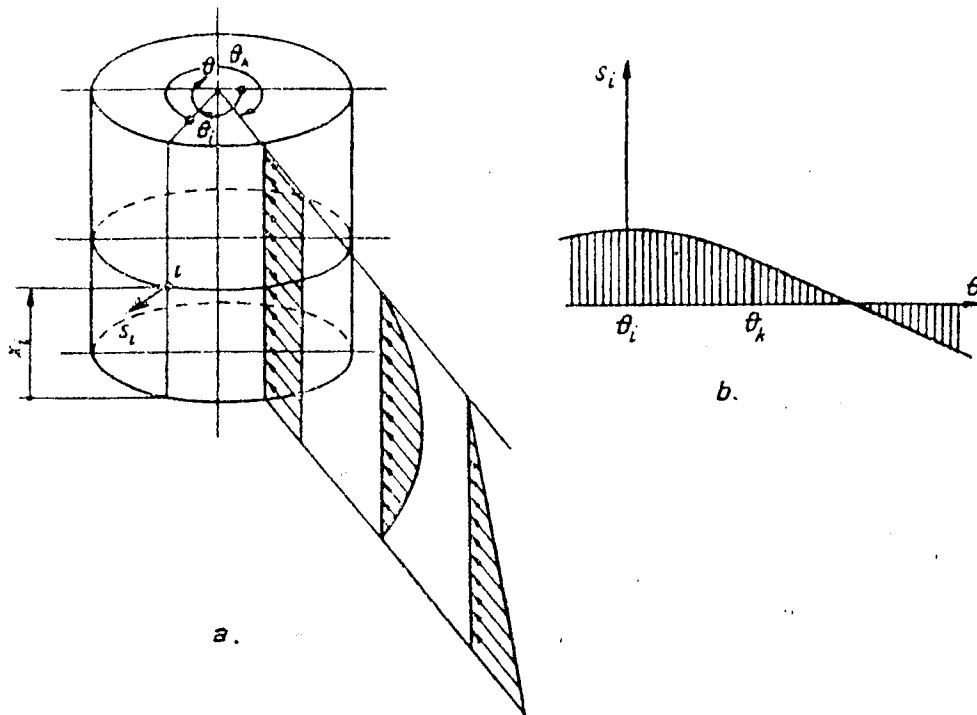


Fig. 6.13

Linii de influență la încărcări radiale distribuite uniform pe înălțimi reduse ale peretelui cilindric:

a – scheme de încărcare;

b – linia de influență pentru S_i .

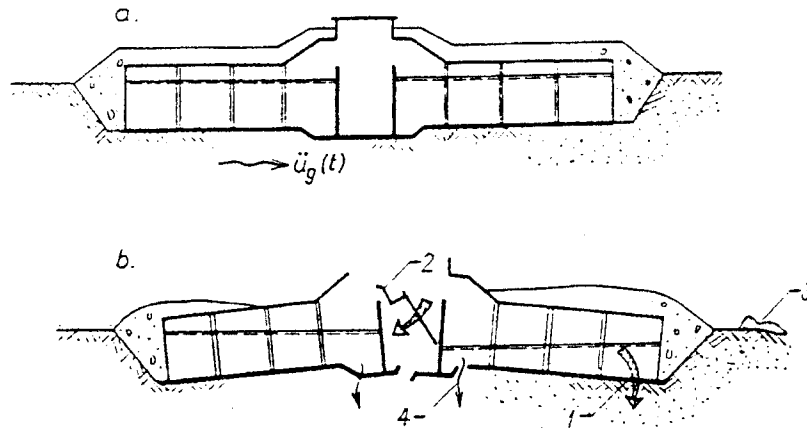


Fig. 6.14 Moduri de cedare a rezervoarelor cilindrice din BA/BP la cutremure majore în amplasament:
a – alcătuirea rezervorului din Niigata – Japonia;
b – după avariere;
 1 – tasare și rotire;
 2 – prăbușirea planșeului peste camera de vane;
 3 – vulcan de nisip;
 4 – exfiltrații.

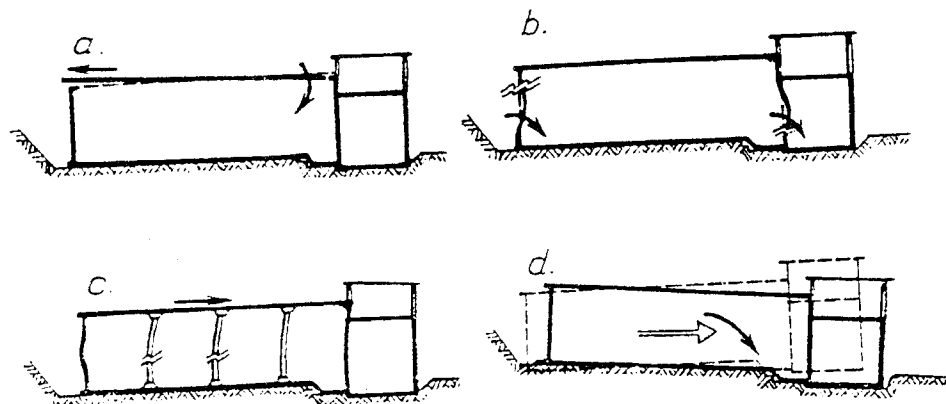


Fig. 6.15 Moduri potențiale de avariere a rezervoarelor:
a – deplasarea și rotirea planșeelor “simplu rezemate”;
b – deplasarea pereților laterali;
c – distrugerea stâlpilor la planșeele ciupercă;
d – alunecarea pe fundație sau înclinarea ansamblului.

În România, la cutremurul Vrancea din martie 1977, rezervoarele de apă au avut puțin de suferit. La rezervoarele de apă din beton armat și beton precomprimat, care constituie cele mai răspândite soluții pentru înmagazinarea apei, s-au înregistrat numai avarii ușoare, constând din fisuri verticale în zona de legătură monolită a camerei de vane cu pereții rezervoarelor; de asemenea, s-au constatat pierderi de apă ca urmare a ruperii conductelor la racordarea acestora cu pereții rezervoarelor.

Din experiența acumulată în urma inventarierii avariilor seismice suferite de rezervoare, se pot evidenția **modurile potențiale de avariere** a acestor structuri (fig. 6.15):

- deplasarea și rotirea planșeelor simplu rezemate sau slab legate;
- distrugerea zonei superioare a pereților;
- torsionarea și pierderea stabilității pereților laterali, în special în zona inferioară;
- distrugerea coloanelor interioare și a stâlpilor de la planșeele ciupercă;
- alunecarea pe fundație sau înclinarea rezervoarelor.

Observațiile directe și măsurătorile efectuate in situ au arătat că o parte dintre aceste avarii se explică prin **acțiunea forțelor de inerție** provocate de accelerația cutremurului, atunci când durata acestuia este mult mai mică decât perioada de oscilație a apei în rezervor.

O altă parte însă, cu consecințe dintre cele mai neplăcute, se explică prin **oscilația masei de apă din rezervor**, indusă de pulsația de accelerații și în special de rezonanța care apare în cazul mișcărilor terenului cu perioadă mare (5 ... 15 s).

După cum se cunoaște, mișcarea pământului în timpul cutremurelor cuprinde atât componente cu perioadă mică, dominante în domeniul accelerațiilor, cât și componente cu perioadă mare, de 3 ... 15 s, semnificative în domeniul deplasărilor.

Analiza seismică a acestor construcții ridică probleme majore și poate fi abordată fie într-o manieră expeditivă, în baza unor modele dinamice simplificate, fie pentru o manieră completă, ținând seama de interacțiunea structură – lichid – teren de fundare.

În cele ce urmează se prezintă (sintetic) o metodă de calcul seismic bazată pe un model dinamic simplificat pentru interacțiunea structură – lichid.

Acțiunile seismice orizontale au ca efect formarea de suprapresiuni hidrodinamice pe pereții și baza rezervorului și punerea în mișcare de oscilație a unei părți a fluidului înmagazinat (efectul de val).

Efectele acțiunii seismice se consideră, în mod convențional, sub forma unor forțe echivalente aplicate static asupra structurii recipientului și sub forma unei denivelări a suprafeței orizontale a fluidului, denumită val.

Determinarea forțelor echivalente, aplicate static, se poate face utilizând modelul Housner (fig. 6.16), în care:

M_i - masa impulsivă reprezentând partea din masa fluidului care se deplasează solidar cu structura recipientului;

M_c - masa convectivă reprezentând partea din masa fluidului care oscilează în recipient sub acțiunea mișcării seismice;

z_i - cota la care este amplasată masa M_i ;

z_c - cota la care este amplasată masa M_c ;

k_c - rigiditatea totală a resortului care fixează masa M_c de peretele rezervorului.

Relațiile de calcul pentru **parametrii modelului Housner**, corespunzător rezervoarelor circulare au formele:

$$(6.62) \quad M_i = \frac{\operatorname{th}\left(\frac{1,7R}{h}\right)}{\frac{1,7R}{h}} M$$

$$(6.63) \quad M_c = 0,71 \frac{\operatorname{th}\left(\frac{1,8h}{R}\right)}{\frac{1,8h}{R}} M$$

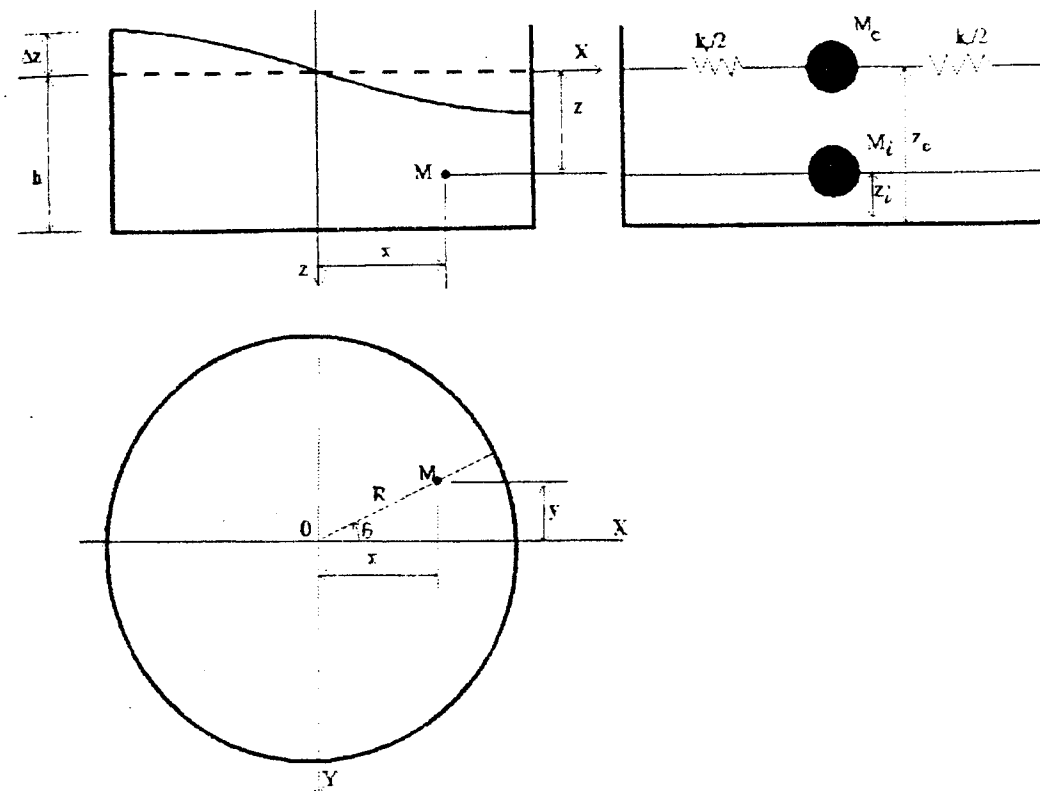


Fig. 6.16

Model simplificat de calcul pentru rezervoare cilindrice circulare din BA/BP în interacțiune dinamică cu apa/lichidul înmagazinat.

$$(6.64) \quad z_i = 0,38h \left[1 + \alpha \left(\frac{M}{M_i} - 1 \right) \right]$$

$$(6.65) \quad z_c = h \left[1 - 0,21 \frac{M}{M_c} \left(\frac{R}{h} \right)^2 + 0,55 \beta \frac{R}{h} \sqrt{0,15 \left(\frac{R}{h} \frac{M}{M_c} \right)^2 - 1} \right]$$

$$(6.66) \quad k_c = \frac{4,75gM_c^2}{MR^2} \cdot h$$

$$(6.67) \quad \Delta z = \delta \frac{0,69 \frac{k_c R}{M_c g}}{1 - 0,92 \frac{\delta \left(\frac{k_c R}{M_c g} \right)^2}{R}}$$

În relațiile precedente:

Δz - denivelarea fluidului în rezervor (evidențiată în fig. 6.16);

g - accelerația gravitațională;

δ - deplasarea orizontală a masei M_c ; această deplasare se alege din spectrul de deplasări al cutremurului de calcul considerând perioada fundamentală de oscilație a masei M_c egală cu $T = 2\pi \sqrt{\frac{M_c}{k_c}}$

și un coeficient de amortizare egal cu 1 % din amortizarea critică; se admite că $\alpha = 0$ și $\beta = 1,0$ în cazul în care se evaluează momentul suprapresiunilor hidrodinamice asupra pereților rezervorului; $\alpha = 1,33$ și $\beta = 2,0$ în situația în care se evaluează momentul suprapresiunilor hidrodinamice asupra bazei rezervorului.

Forțele rezultante exercitate de masele M_i și M_c sunt egale cu $(a_h g M_i)$ și $(\delta k_c / 2)$, în care a_h este coeficientul seismic al amplasamentului.

Suprapresiunile hidrodinamice impulsive pe peretele cilindric se pot calcula cu ajutorul relațiilor:

- suprapresiunile pe peretele vertical al recipientului:

$$(6.68) \quad p = a_h \rho g h \sqrt{3} \cos \theta \left[\frac{z}{h} - \frac{1}{2} \left(\frac{z}{h} \right)^2 \right] \left[\operatorname{th} \sqrt{3} \left(\frac{R}{h} \right) \right]$$

- suprapresiunile pe baza recipientului:

$$(6.69) \quad p_b = a_h \rho g h \frac{\sqrt{3}}{2} \left[\frac{\operatorname{sh} \sqrt{3} \left(\frac{x}{h} \right)}{\operatorname{ch} \sqrt{3} \left(\frac{y}{h} \right)} \right]$$

unde x, y, z și R sunt definite în fig. 6.16;

a_h - coeficientul seismic al amplasamentului;

ρ - densitatea fluidului înmagazinat.

Suprapresiunile hidrodinamice convective pentru rezervoare circulare se pot calcula cu ajutorul relațiilor:

- suprapresiunile pe peretele vertical al recipientului:

$$(6.70) \quad p = \rho \frac{R^2}{3} \sqrt{\frac{27}{8}} \left(1 - \frac{\cos^2 \theta}{3} - \frac{\sin^2 \theta}{2} \right) \cos \theta \left(\frac{\operatorname{ch} \sqrt{\frac{27}{8}} \frac{h-z}{R}}{\operatorname{sh} \sqrt{\frac{27}{8}} \frac{h}{R}} \right) \phi_0 \omega_0^2$$

- suprapresiunile pe baza recipientului:

$$(6.71) \quad p_b = \rho \frac{R^2}{3} \sqrt{\frac{27}{8}} \left(1 - \frac{\cos^2 \theta}{3} - \frac{\sin^2 \theta}{2} \right) \cos \theta \left(\frac{1}{\operatorname{sh} \sqrt{\frac{27}{8}} \frac{h}{R}} \right) \phi_0 \omega_0^2$$

în care : ρ - densitatea fluidului înmagazinat;
 ϕ_0 - mărimea unghiului dintre suprafața lichidului în timpul oscilației și direcția orizontală.

Valoarea ϕ_0 se calculează cu ajutorul relației:

$$(6.72) \quad \phi_0 = 0,83 \frac{S_a}{g},$$

în care S_a se obține din **spectrul de accelerații al cutremurului de calcul** pentru o perioadă proprie de oscilație a fluidului egală cu:

$T = \frac{2\pi}{\omega_0}$, în care valoarea ω_0 (pulsatia lichidului) se calculează cu relația:

$$(6.73) \quad \omega_0^2 = \frac{g}{R} \sqrt{\frac{27}{8}} \left(\text{th} \sqrt{\frac{27}{8}} \frac{h}{R} \right)$$

g - accelerația gravitațională; x , z și θ sunt definite în fig. 6.16.

Efectele acțiunii seismice se consideră sub forma sporirii masei inerțiale a structurii cu masa fluidului înmagazinat.

Determinarea eforturilor structurale datorate acțiunilor seismice se poate realiza utilizând una din următoarele metode:

- metode analitice bazate pe rezolvarea analitică a ecuației ce descrie mișcarea fluidului în recipient în timpul acțiunii seismice;
- metode aproximative bazate pe elemente finite și diferențe finite;
- metode bazate pe modele dinamice simplificate.

Determinarea eforturilor structurale totale se poate realiza astfel:

a) Sub efectul acțiunilor seismice orizontale se determină eforturile provocate de forțele de inerție corespunzătoare structurii

recipientului (N_0), suprapresiunilor hidrodinamice impulsive (N_0^i) și suprapresiunilor dinamice convective (N_0^c).

Aceste eforturi se pot considera cu valorile cele mai defavorabile din următoarele două variante:

$$N_{0t} = N_0 + N_0^i + 0,8 N_0^c$$

(6.74)

$$N_{0t} = 0,8(N_0 + N_0^i) + N_0^c$$

b) Sub efectul acțiunilor seismice verticale se determină eforturile provocate de forțele de inerție corespunzătoare structurii recipientului (N_v) și suprapresiunilor dinamice impulsive (N_v^i).

Aceste eforturi se pot considera cu valorile rezultate din combinația:

$$(6.75) \quad N_{vt} = N_v - N_v^i$$

Eforturile totale rezultă din combinația:

$$(6.76) \quad N_t = N_{0t} + N_{vt}$$

6.3.1. CALCULUL REZERVOARELOR CILINDRICE LA VARIAȚIA DE TEMPERATURĂ

Calculul stării de eforturi și deformații în structura recipientilor din beton armat sau beton precomprimat, precum și verificarea siguranței structurale la diferite stări limită se face luând în considerare toate combinațiile defavorabile /6/, practic posibile, ale acțiunilor ce pot interveni în viața acestor construcții.

Acțiunile și gruparea acestora se vor lua în considerare în conformitate cu prevederile STAS 10101/0A-77 "Acțiuni în construcții și gruparea acțiunilor pentru construcții civile și industriale".

Pentru recipiente cu destinația specială se pot lua în calcul și alte acțiuni, date prin reglementări speciale sau precizate prin tema de proiectare cum ar fi **acțiunea agresivă chimică industrială**.

În cazul recipientilor pentru lichide se impun determinarea stării de eforturi și deformații precum și verificarea siguranței structurale la diferite stări limită, în două scheme de încărcare ce aparțin grupării speciale:

- **schema 1**, recipient gol acționat de încărcările gravitaționale, încărcarea din precomprimare (dacă structura este precomprimată), presiunea dinamică a pământului și forțele seismice corespunzătoare masei proprii a structurii;

- **schema 2**, recipient umplut cu lichid acționat de încărcări gravitaționale, încărcarea din precomprimare, presiunea hidrostatică, presiunea hidrodinamică și forțele seismice corespunzătoare masei proprii a structurii.

În mod curent, în schemele de mai sus, se neglijează acțiunile variațiilor de temperatură și a vântului (presiune și sucțiune).

În cazul rezervoarelor de fermentare a nămolului (metantancuri), din stațiile de epurare, sau a altor tipuri de recipiente în care lichidul este încălzit permanent, în **gruparea specială** trebuie să se introducă și **acțiunea variației de temperatură**, cu condiția ca starea de eforturi din variația de temperatură să fie determinată pentru **rigiditatea reală a componentelor structurale**.

Atunci când conținutul este încălzit permanent la o temperatură superioară celei a mediului ambiant, acțiunea temperaturii se introduce în gruparea fundamentală.

Acțiunile modelate prin încărcări ce trebuie luate în calcul sunt:

- greutatea proprie a elementelor de construcție, inclusiv greutatea izolațiilor, protecțiilor și instalațiilor;
- greutatea utilajelor și oamenilor care circulă pe planșeul de acoperiș;
- greutatea și presiunea hidrostatică exercitată de lichidul înmagazinat, inclusiv eventuala presiune a gazelor din interior;
- împingerea activă a pământului, simetrică sau nesimetrică, inclusiv efectul datorat încărcărilor aplicate la nivelul terenului;
- încărcările date de vânt și zăpadă;
- presiunea apei subterane acționând pe fața exterioară a radierului și pereților;
- precomprimarea în cazul recipientilor din beton precomprimat;
- acțiunea seismică de cod.

Acțiunile modelate prin deformații sunt:

- contractia și curgerea lentă a betonului;
- acțiunea variațiilor de temperatură, climatice sau tehnologice.

Acțiunile modelate prin deplasări sunt reprezentate de cedările de reazem și tasările diferențiate.

Recipientii trebuie astfel proiectați și executați încât să se evite **cedările potențiale de reazeme**, iar tasările diferențiate să fie limitate la maximum în scopul păstrării funcționalității lor.

Încărcările gravitaționale se determină în conformitate cu prevederile STAS 10101/1-78.

Încărcările date de vânt și zăpadă se determină conform prevederilor din STAS 10101/20-90 și 10101/21-92.

În vederea determinării **acțiunilor din variațiile de temperatură**, valorile de calcul ale temperaturii exterioare se consideră conform STAS 10101/23A-78, iar cele ale temperaturii interioare pe baza datelor din tema tehnologică.

Pentru determinarea variației de temperatură pe grosimea pereților și a straturilor termoizolante ce formează structura de ansamblu a pereților, valorile conductivităților termice (λ) ale materialelor implicate și cele ale coeficienților de transfer termic prin convecție pe suprafața interioară și pe cea exterioară se stabilesc în baza prevederilor din STAS 6472/3-84, calculul câmpului de temperaturi realizându-se cu programe specializate, bazate pe metoda elementelor finite.

Se admite că **influența însoleierii asimetrice a recipientelor** poate fi determinată, în mod simplificat, prin echivalarea cu o diferență de temperatură între partea însorită și cea umbrită de maximum 20°C.

În /6/ se recomandă ca efectele variațiilor de temperatură să fie evaluate luând în considerare descompunerea variației de temperatură în două variații de temperatură elementare:

- o variație de temperatură uniformă pe grosimea elementului:

$$(6.77) \quad T_0 = (t_i + t_e) / 2$$

- o variație de temperatură neuniformă pe grosimea elementului cu valoarea zero în suprafața mediană:

$$(6.78) \quad \Delta T_0 = (t_i - t_e) / 2.$$

Se menționează faptul că **acțiunea datorată contracției și curgerii lente** a betonului se va evalua în baza prevederilor cuprinse în STAS 10107/0-90.

6.3.2. CALCULUL SEISMIC AL REZERVOARELOR CILINDRICE DUPĂ COD /6/

Conform codului de proiectare pentru structurile de rezistență ale recipientelor din BA sau BP, elaborat de către INCERC București, pentru aceste tipuri de construcții se vor considera, în calcul, următoarele moduri de manifestare a acțiunii seismice:

a) forțe de inerție generate de oscilațiile masei structurii în urma antrenării acesteia în mișcarea seismică, de către accelerațiile de la nivelul interfeței teren–radier;

b) forțe dinamice transmise construcției de instalații și echipamente prin intermediul sistemelor de legătură și de rezemare a acestora pe structură;

c) suprapresiuni, de tipul presiunilor hidrodinamice, generate de trecerea fluidului înmagazinat sau a pământului din jurul recipientului din starea de repaos în regim dinamic.

Forțele de inerție generate de mișcarea masei structurii și forțele dinamice produse de instalații și echipamente se determină conform prevederilor din normativul P 100–92.

În cazurile curențe de recipiente cilindrice se poate admite, în mod simplificat, **calculul forțelor seismice datorate masei structurii** după următorul procedeu:

a.1) componentele încărcării seismice acționând pe un element infinitesimal de placă (fig. 6.17), cu grosimea "h", se determină cu relațiile:

$$(6.79) \quad \begin{aligned} X &= 0 \\ Y &= -q_{s0} \cdot \xi \sin \theta \\ Z &= q_{s0} \cdot \xi \cos \theta, \end{aligned}$$

în care:

$$(6.80) \quad \begin{aligned} q_{s0} &= c_s \cdot \psi \cdot \gamma_b \cdot h \\ \xi &= x / H \end{aligned}$$

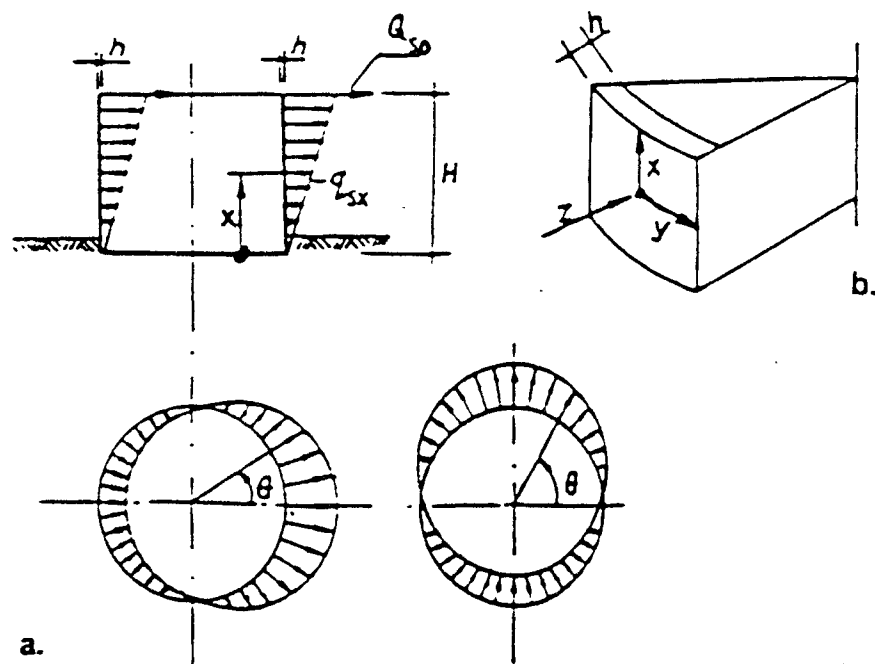


Fig. 6.17 Model de calcul pentru suprafețe cilindrice verticale, circulare, la **acțiuni laterale nesimetrice**:

a – distribuția radială a acțiunii seismice;
b – componentele acțiunii seismice laterale.

a.2) Încărcarea seismică datorată masei acoperișului ce revine pereților:

- componenta după direcția razei:

$$(6.81) \quad Q_{sz} = Q_{s0} \cos \theta$$

$$(6.82) \quad Q_{s0} = c_s \cdot \psi \cdot G_a \quad (I_p / \sum I_{ev})$$

- componenta după direcția tangentei la circumferință:

$$(6.83) \quad Q_{s\theta} = - Q_{s0} \sin \theta$$

În relația (6.82) se evidențiază:

G_a - greutatea acoperișului;

I_p - momentul de inerție al pereților;

$\sum I_{ev}$ - suma momentelor de inerție ale elementelor portante verticale, pereți și stâlpi;

$c_s = \alpha \cdot K_s \cdot \beta_{max}$ reprezintă coeficientul seismic global conform codului național P 100-92;

ψ - coeficient de reducere a efectelor acțiunii seismice care poate fi estimat conform P 100-92.

Presiunea hidrodinamică este separată în două părți: presiunea impulsivă p_i , proporțională cu accelerația terenului, respectiv presiunea convectivă p_c , datorată oscilației fluidului înmagazinat. Se precizează faptul că **presiunea hidrodinamică** se consideră ca o **încărcare statică echivalentă**.

Presiunea hidrodinamică impulsivă se determină cu relația:

$$(6.84) \quad p_i = c_s \cdot \rho \cdot g \cdot H \cdot F_i \cdot \cos \theta / 2$$

Presiunea hidrodinamică convectivă se evaluează cu relația:

$$(6.85) \quad p_c = c_s \cdot \rho \cdot g \cdot H \cdot T_c \sqrt{\sum_{k=1}^{10} \left(\frac{F_{c,k}}{T_k} \right)^2} \cdot \cos \theta$$

În relațiile precedente:

ρ - densitatea fluidului înmagazinat;

H - înălțimea coloanei de fluid;

R - raza interioară a recipientului cilindric;

T_c - perioada de colț conform datelor din P 100–92;

T_k - perioada proprie în modul k de vibrație, care poate fi stabilită prin:

$$(6.86) \quad T_k = \frac{2\pi}{\sqrt{g \cdot \lambda_k \cdot \tan h(\lambda_k \cdot H/R) / R}}$$

De asemenea:

$$(6.87) \quad F_i = \left(\frac{R}{H} \right) \left[1 - \sum_{k=1}^{10} A_k \right]$$

$$(6.88) \quad F_{c,k} = \left(\frac{R}{H} \right) \cdot A_k$$

$$(6.89) \quad A_k = \frac{2}{\lambda_k^2 - 1} \cdot \frac{\cosh \left(\frac{\lambda_k \cdot H}{R \cdot \xi} \right)}{\cosh \left(\frac{\lambda_k \cdot H}{R} \right)}$$

Se amintește faptul că parametrul ξ reprezintă coordonata adimensională a secțiunii orizontale de calcul [$\xi = x / H$, $\xi \in [0, 1]$, x - cota secțiunii], iar λ_k este rădăcina de ordin k a ecuației $J_1(\lambda_k) = 0$, în care J_1 este funcție Bessel de speța întâi.

Pentru valori ale rapoartelor $B = H/R$ cuprinse între 0,2 și 2, conform /6/, se admite efectuarea unui **calcul simplificat al rezultatelor presiunilor impulsive și convective**, al cotelor la care sunt aplicate aceste rezultante și al presiunilor la baza peretelui, utilizând următoarele relații:

- rezultantele presiunilor hidrodinamice:

$$(6.90) \quad P_i = 0,4309 \cdot c_s \cdot V \cdot \rho \cdot g \cdot B^{1,1734} / e^{0,4667 B}$$

$$(6.91) \quad P_c = 0,3415 \cdot c_s \cdot V^{5/6} \cdot \rho \cdot g^{3/2} \cdot B^{0,6674} \cdot T_c / e^{1,0939 B}$$

- cotele punctelor de aplicare a rezultatelor presiunilor hidrodinamice:

$$(6.92) \quad z_{gi} = 0,3863 \cdot He^{0,04986 B} / B^{0,0236}$$

$$(6.93) \quad z_{gc} = 0,4741 \cdot He^{0,2383 B} / B^{0,01072}$$

- presiunile maxime la baza peretelui, pentru $V = \pi \cdot R^2 \cdot H$:

$$(6.94) \quad p_{i0} = 2p_i (2 - 3z_{gi} / H) / H / \pi / R$$

$$(6.95) \quad p_{c0} = 2p_c (2 - 3z_{gc} / H) / H / \pi / R$$

Practic pentru suprapresiunile hidrodinamice impulsive (respectiv convective) pe radier, se admite o variație liniară între $-p_{i0}$ și p_{i0} (respectiv între $-p_{c0}$ și p_{c0}).

În regim seismic se consideră **acțiunea dinamică a pământului**, semnificativă mai ales în cazul recipientilor îngropați sau semiîngropați, cu pereți verticali.

Presiunea dinamică a pământului se calculează cu relațiile:

- presiunea **activă** dinamică:

$$(6.96) \quad p_{ad} = (1 + 2 c_s \operatorname{tg} \Phi) p_{as}$$

- presiunea **pasivă** dinamică:

$$(6.97) \quad p_{pd} = (1 - 2 c_s \operatorname{tg} \Phi) p_{ps}$$

În relațiile precedente, au fost acceptate notațiile:

- c_s - coeficientul seismic global determinat conform prevederilor normativului P 100 – 92;
- Φ - unghiul de frecare interioară a pământului;
- p_{as} - presiunea activă a pământului în regim static;
- p_{ps} - presiunea pasivă a pământului în regim static.

La **încadrarea recipientilor în clasele de importanță** prevăzute în normativul P 100–92 se va ține cont de următoarele recomandări:

- recipientii de tip curent se vor încadra în clasa III de importanță, pentru care $\alpha = 1,00$;
- recipientii cu capacități de înmagazinare mai mare de $20\,000\text{ m}^3$, cei care asigură rezerva de apă de incendiu sau rezerva tehnologică de avarie precum și cei care fac parte din schemele centralizate de alimentare cu apă, pot fi încadrați în clasa I sau II de importanță, în urma unor justificări competente.

Calculul stării de eforturi și deformații în structura de rezistență a recipientilor se bazează pe necesitatea satisfacerii unor exigențe specifice; acest calcul se va efectua în **domeniul liniar elastic** indiferent de forma structurii, soluția constructivă adoptată și materialele utilizate (beton armat sau beton precomprimat), cu ajutorul unor metode analitice sau numerice.

Calculul stării de eforturi se va face luând în considerare conlucrarea statică structură–teren de fundare precum și conlucrarea

între diversele elemente structurale componente, modelând în mod corespunzător legătura dintre acestea, funcție de alcătuirea constructivă concretă.

La structurile axial simetrice, alcătuite din plăci plane și curbe, starea de eforturi se va determina în teoria de încovoiere având la bază ipotezele Love–Kirkchoff.

Starea de eforturi datorată acțiunii variațiilor de temperatură se determină pe baza unei modelări corespunzătoare a variațiilor de temperatură luând în considerare rigiditățile reale, calculate pentru fiecare element structural în parte.

Calculul rigidităților se poate efectua în baza prevederilor generale cuprinse în STAS 10107/0-90, precum și a datelor evidențiate în **Anexa 7**.

În cazul recipientilor cilindrici cu legături elastice din cordoane de cauciuc, la nivelul rostului perete – radier, se va considera modelarea diferențiată a acestui tip de legătură pentru încărcarea din precomprimare și restul acțiunilor.

În **faza de precomprimare**, este necesar ca la nivelul legăturii perete – radier condiția de contur să exprime compatibilitatea dintre deformația cordonului de cauciuc și deformația peretelui produsă de forțele exterioare de precomprimare și forțele de legătură din interfața perete - cordon.

Verificarea și dimensionarea elementelor structurii de rezistență a recipientilor se va face la starea limită de rezistență și starea limită de deschidere a fisurilor, cu următoarele precizări:

a) deschiderea medie a fisurilor de calcul și eforturilor unitare de compresiune remanentă pentru recipientii din beton precomprimat se vor încadra în limitele înscrise în tabelul din **Anexa 8**;

b) verificarea la starea limită de deschidere a fisurilor a elementelor prefabricate din beton armat se va face și la manipulare ținând seama de coeficienții de impact, deschiderea maximă efectivă fiind limitată la $0,10\text{ mm}$;

c) în calculul capacității portante a rosturilor dintre elementele prefabricate se va considera un coeficient al condițiilor de lucru (m) cu valorile:

$$m = 1,00 \text{ pentru } \alpha = 0;$$

$$m = 0,80 \text{ pentru } \alpha = 0,15,$$

în care α reprezintă unghiul format de fețele prefabricatelor în rost;

d) pentru elementele prefabricate din beton precomprimat, verificarea la fisurare se va face conform clasei a II-a de verificare la fisurare;

e) efortul unitar de control (σ_{pk}) în armătura pretensionată nu va depăși 0,75 din rezistența caracteristică a oțelului utilizat la recipientii precomprimați cu fascicule, cu un capăt înglobat, precum și la armăturile postîntinse exterioare;

f) verificarea la fisurare a recipientilor cilindrici precomprimați prin înfășurare se va face ținând seama de un coeficient de imprecizie a forței de precomprimare specific instalației de înfășurare.

Efortul unitar de control în armătura pretensionată va corespunde instalației folosite, dar nu va depăși 0,70 din rezistența caracteristică a oțelului utilizat.

g) valorile limită ale eforturilor unitare de compresiune la transfer se vor limita conform prevederilor din STAS 10107/0-90, ținând seama și de instrucțiunile tehnice C 170-87;

h) în cazul recipientilor pentru înmagazinarea unor lichide cu temperaturi ale fluidului mai mari decât $+ 20^{\circ}\text{C}$, valoarea pierderii de tensiune din relaxarea armăturii se va majora cu 10 % pentru temperatura de $+ 30^{\circ}\text{C}$ și cu 30 % pentru temperatura de $+ 40^{\circ}\text{C}$, pentru valorile intermediare efectuându-se o interpolare liniară.

6.3.3. VERIFICAREA REZERVOARELOR LA STABILITATE GENERALĂ

Verificarea stabilității generale (de ansamblu) a recipientilor impune:

- verificarea stabilității **la plutire** în cazul recipientilor aflați sub influența apei subterane;
- verificarea stabilității **la alunecare și răsturnare** în timpul acțiunii seismice;
- verificarea stabilității pereților **la eforturile de compresiune inelară**.

Verificarea stabilității la plutire se face impunând drept criteriu de verificare satisfacerea inegalității:

$$(6.98) \quad 1,2 F_a < \Sigma G_i + F_f$$

în care: F_a - forța arhimedică;

ΣG_i - suma încărcărilor gravitaționale ce exclude greutatea lichidului înmagazinat;

F_f - rezultanta forțelor de frecare între structură și pământ.

Verificarea stabilității generale la alunecare se face cu relația:

$$(6.99) \quad 1,1 (P_i + P_c) < \mu_f \Sigma G$$

în care: P_i - componenta orizontală a rezultantei presiunilor hidrodinamice impulsive pe peretele recipientului;

P_c - componenta orizontală a rezultantei presiunilor hidrodinamice convective pe peretele recipientului;

μ_f - coeficientul de frecare beton – teren, cu valori între 0,1 ... 0,3, funcție de natura terenului;

ΣG - suma încărcărilor gravitaționale inclusiv greutatea apei și pământului, aferente elementelor structurale ce participă la stabilirea ansamblului sau a structurii în ansamblul ei.

Verificarea stabilității globale la răsturnare se efectuează cu relația:

$$(6.100) \quad 1,1 [(P_i z_{gi} + P_c z_{gc}) + M_{rPHD}] < M_s$$

unde: M_{rPHD} - momentul de răsturnare corespunzător presiunilor hidrodinamice pe radier;

M_s - momentul de stabilitate;

z_{gi} - înălțimea planului orizontal în care acționează rezultanta presiunilor hidrodinamice impulsive (P_i);

z_{gc} - înălțimea planului orizontal în care acționează rezultanta presiunilor hidrodinamice convective (P_c).

Verificarea presiunilor pe teren în regim dinamic se face cu relația:

$$(6.101) \quad p_{td} < 1,45 p_{ts}$$

unde: p_{td} - presiunea pe teren în regim dinamic;

p_{ts} - presiunea pe teren în regim static;

Verificarea stabilității pereților se face la acțiunea eforturilor inelare de compresiune.

Grosimea pereților structurilor axial simetrice trebuie să satisfacă atât condițiile de etanșeitate cât și condiția de stabilitate la eforturile de compresiune inelară n_0 .

Stabilitatea la eforturile de compresiune inelară, în **ipoteza rezervorului gol** acționat de sarcinile gravitaționale, încărcarea din precomprimare și presiunea dinamică a pământului, este asigurată dacă este satisfăcută inegalitatea:

$$(6.102) \quad 1,2 \sigma_{0, \text{efectiv}} < \sigma_{0, \text{critic}}$$

Efortul unitar critic de compresiune se estimează cu relația:

$$(6.103) \quad \sigma_{0, \text{critic}} = 0,66121 E_b \cdot h/l \cdot (h/R)^{0,5}$$

în care E_b reprezintă modulul de elasticitate a betonului, h - grosimea peretelui, l - înălțimea peretelui cilindric, R - raza corespunzătoare suprafeței mediane a peretelui.

Suplimentar, este necesară verificarea legăturilor pereților cu radierul și planșeul de acoperiș, respectiv verificarea lunecărilor potențiale în rosturile dintre elementele prefabricate.

a) Legăturile peretelui cu radierul și planșeul de acoperiș trebuie verificate, pe întregul contur, la eforturile ce apar în cele două grupări speciale.

b) Având în vedere eforturile secționale tangențiale și momentele de torsiune datorate presiunilor hidrodinamice, se impune corelarea grosimii elementelor și a armării rosturilor luând în considerare eforturile unitare de lunecare efective ce pot apare în regim dinamic.

Proiectarea tehnologică va avea în vedere evitarea transmiterii de forțe dinamice la cuva recipientilor, prin prevederea de compensatori sau manșoane de expansiune pe conducte, înainte de intrarea acestora în cuva recipientului.

Concepția, execuția și verificarea instalațiilor și echipamentelor se va face în baza normelor specifice cât și a celor cuprinse în capitolul 10 din normativul P 100 – 92.

6.3.4. EXIGENȚE PRIVIND AMPLASAMENTUL ȘI TERENUL DE FUNDARE

La alegerea amplasamentului se va urmări încadrarea optimă a rezervorului în schema tehnologică a ansamblului din care face parte, cu respectarea distanțelor de protecție impuse de destinația lui și natura terenului de fundație.

La amplasarea recipientilor se vor evita versanții cu pante abrupte, terenurile instabile cu compresibilitate mare sau sensibile la umezire, terenurile contractile, lichefiabile.

De asemenea /6/, se vor evita în zonele din vecinătatea unor instalații sau procese tehnologice la care se pot produce pierderi mari de lichide (agresive sau neagresive), conducând la ridicarea temporară sau permanentă a nivelului apelor subterane.

În toate cazurile și mai ales în cazul recipientilor fundați pe pământuri sensibile la umezire sau amplasați pe versanți, se vor lua **măsuri de amenajare a scurgerii apelor din precipitații**, prevăzând pante, rigole, șanțuri, care să asigure colectarea și evacuarea apelor atât pe durata executării lucrărilor cât și după darea în exploatare a recipientului. În cazul terenurilor sensibile la umezire amenajările vor fi concepute în conformitate cu normativul P 7 – 92.

La alegerea amplasamentului în plan a recipientilor și a construcțiilor anexe se vor asigura **condiții pentru control** cel puțin la nivelul radierului, în vederea efectuării eventualelor remedieri, precum și pentru asigurarea spațiilor libere impuse de tehnologia de executare a recipientilor din beton precomprimat.

Fundarea directă a recipientilor se poate face pe terenuri cu caracteristici fizico – mecanice corespunzătoare presiunii efective, care să nu fie contractile sau sensibile la umezire.

Se precizează faptul că **fundarea directă pe nisipuri lichefiabile nu este permisă**.

Pentru fundarea pe terenuri cu caracteristici fizico – mecanice slabe se prevăd următoarele măsuri:

- compactarea suprafeței terenului la cota de fundare, obligatorie, indiferent de natura terenului;

- executarea unei perne de balast compactat, pe un pat de pământ cilindrât;

- decaparea unui strat din pământul compresibil și înlocuirea lui cu o pernă din balast compactat.

În cazul pământurilor contractile se vor lua măsurile prevăzute în instrucțiunile tehnice P 70-79.

În **cazul pământurilor sensibile la umezire** se vor lua măsurile prevăzute în **normativul P 7-92**.

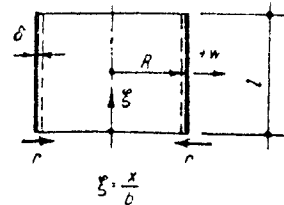
La stabilirea soluțiilor de fundare se va ține cont de concluziile studiului geotehnic și în special, de seismicitatea naturală a amplasamentului.

În **cazul fundării recipientilor în terenuri cu nivel freatic ridicat**, cu tendințe de variație în timp, este necesară prevederea următoarelor măsuri:

- protecția corespunzătoare a fundațiilor, radierului și a pereților ce vin în contact cu apa freatică împotriva penetrării (infiltrării) acesteia în recipient, prin executarea de hidroizolații eficiente;

- execuția în uscat a lucrărilor prin prevederea măsurilor corespunzătoare de scădere a nivelului apelor subterane în perioada de execuție.

În **cazul fundării indirecte** (fundație pe piloți sau barete) se va executa un radier sau rețea de grinzi între fundația indirectă și recipient.



$$n_{0r} = \frac{b}{\delta} r k_1 \quad m_{xr} = b r k_2 \quad t_{xr} = r k_3$$

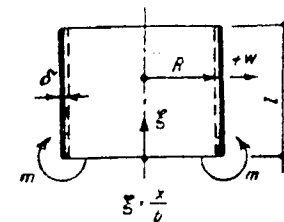
$$D w_r = b^3 r k_4 \quad D z_r = b^2 r k_5$$

$$m_{xr, \max} = -0,3224 b r, \text{ in secțiunea } \xi = 0,7854$$

$$b = \sqrt{\frac{R \delta}{\sqrt{3}}} \quad D = \frac{E \delta^3}{12}$$

ξ	$k_1(\xi)$	$k_2(\xi)$	$k_3(\xi)$	$k_4(\xi)$	$k_5(\xi)$	ξ
4,0	0,0415	0,0139	-0,0019	0,0060	-0,0129	4,0
3,9	0,0509	0,0139	0,0008	0,0074	-0,0143	3,9
3,8	0,0613	0,0137	0,0040	0,0088	-0,0157	3,8
3,7	0,0726	0,0131	0,0079	0,0105	-0,0170	3,7
3,6	0,0849	0,0121	0,0124	0,0123	-0,0183	3,6
3,5	0,0979	0,0106	0,0177	0,0141	-0,0194	3,5
3,4	0,1118	0,0085	0,0237	0,0161	-0,0204	3,4
3,3	0,1262	0,0058	0,0306	0,0182	-0,0211	3,3
3,2	0,1410	0,0024	0,0383	0,0203	-0,0215	3,2
3,1	0,1559	-0,0019	0,0469	0,0225	-0,0216	3,1
3,0	0,1707	-0,0070	0,0563	0,0246	-0,0211	3,0
2,9	0,1851	-0,0132	0,0666	0,0267	-0,0201	2,9
2,8	0,1985	-0,0204	0,0777	0,0287	-0,0185	2,8
2,7	0,2105	-0,0287	0,0895	0,0304	-0,0160	2,7
2,6	0,2209	-0,0383	0,1019	0,0318	-0,0127	2,6
2,5	0,2278	-0,0491	0,1149	0,0329	-0,0083	2,5
2,4	0,2317	-0,0613	0,1282	0,0335	-0,0028	2,4
2,3	0,2314	-0,0748	0,1416	0,0334	0,0040	2,3
2,2	0,2259	-0,0896	0,1548	0,0326	0,0122	2,2
2,1	0,2142	-0,1057	0,1675	0,0309	0,0219	2,1
2,0	0,1951	-0,1231	0,1794	0,0282	0,0334	2,0
1,9	0,1675	-0,1415	0,1899	0,0242	0,0466	1,9
1,8	0,1301	-0,1610	0,1985	0,0188	0,0617	1,8
1,7	0,0815	-0,1812	0,2047	0,0118	0,0788	1,7
1,6	0,0204	-0,2018	0,2077	0,0030	0,0980	1,6
1,5	-0,0547	-0,2226	0,2068	-0,0079	0,1192	1,5
1,4	-0,1452	-0,2430	0,2011	-0,0210	0,1425	1,4
1,3	-0,2525	-0,2626	0,1897	-0,0365	0,1678	1,3
1,2	-0,3781	-0,2807	0,1716	-0,0546	0,1949	1,2
1,1	-0,5230	-0,2967	0,1457	-0,0755	0,2238	1,1
1,0	-0,6886	-0,3096	0,1108	-0,0994	0,2542	1,0
0,9	-0,8755	-0,3185	0,0658	-0,1264	0,2856	0,9
0,8	-1,0844	-0,3223	0,0093	-0,1565	0,3177	0,8
0,7	-1,3157	-0,3199	-0,0599	-0,1899	0,3499	0,7
0,6	-1,5691	-0,3099	-0,1431	-0,2265	0,3814	0,6
0,5	-1,8439	-0,2908	-0,2415	-0,2661	0,4115	0,5
0,4	-2,1387	-0,2610	-0,3564	-0,3087	0,4392	0,4
0,3	-2,4517	-0,2189	-0,4888	-0,3539	0,4633	0,3
0,2	-2,7796	-0,1627	-0,6398	-0,4012	0,4825	0,2
0,1	-3,1188	-0,0903	-0,8100	-0,4502	0,4953	0,1
0	-3,4641	0,0000	-1,0000	-0,5000	0,5000	0

Acțiunea momentului uniform distribuit "m" la marginea inferioară.



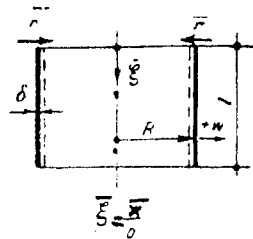
$$n_{0m} = \frac{1}{\delta} m f_1 \quad m_{xm} = m f_2 \quad t_{xm} = \frac{1}{b} m f_3$$

$$D w_m = b^2 m f_4 \quad D z_m = b m f_5$$

$$b = \sqrt{\frac{R \delta}{\sqrt{3}}} \quad D = \frac{E \delta^3}{12}$$

ξ	$f_1(\xi)$	$f_2(\xi)$	$f_3(\xi)$	$f_4(\xi)$	$f_5(\xi)$	ξ
4,0	0,0065	-0,0258	0,0277	0,0009	0,0120	4,0
3,9	-0,0027	-0,0286	0,0278	-0,0004	0,0147	3,9
3,8	-0,0139	-0,0314	0,0274	-0,0020	0,0177	3,8
3,7	-0,0273	-0,0341	0,0262	-0,0039	0,0210	3,7
3,6	-0,0430	-0,0366	0,0242	-0,0062	0,0245	3,6
3,5	-0,0613	-0,0389	0,0212	-0,0089	0,0283	3,5
3,4	-0,0822	-0,0408	0,0171	-0,0119	0,0323	3,4
3,3	-0,1050	-0,0422	0,0116	-0,0153	0,0364	3,3
3,2	-0,1327	-0,0431	0,0048	-0,0192	0,0407	3,2
3,1	-0,1624	-0,0431	-0,0037	-0,0234	0,0450	3,1
3,0	-0,1951	-0,0423	-0,0141	-0,0282	0,0493	3,0
2,9	-0,2307	-0,0403	-0,0263	-0,0333	0,0534	2,9
2,8	-0,2691	-0,0369	-0,0407	-0,0388	0,0573	2,8
2,7	-0,3100	-0,0320	-0,0574	-0,0448	0,0608	2,7
2,6	-0,3531	-0,0254	-0,0766	-0,0510	0,0636	2,6
2,5	-0,3980	-0,0166	-0,0983	-0,0575	0,0658	2,5
2,4	-0,4440	-0,0050	-0,1226	-0,0641	0,0669	2,4
2,3	-0,4904	0,0080	-0,1495	-0,0708	0,0668	2,3
2,2	-0,5352	0,0244	-0,1792	-0,0774	0,0652	2,2
2,1	-0,5803	0,0439	-0,2114	-0,0838	0,0618	2,1
2,0	-0,6214	0,0667	-0,2461	-0,0897	0,0563	2,0
1,9	-0,6578	0,0932	-0,2831	-0,0950	0,0484	1,9
1,8	-0,6877	0,1234	-0,3220	-0,0993	0,0375	1,8
1,7	-0,7091	0,1576	-0,3623	-0,1024	0,0235	1,7
1,6	-0,7195	0,1959	-0,4036	-0,1039	0,0059	1,6
1,5	-0,7163	0,2384	-0,4451	-0,1034	-0,0158	1,5
1,4	-0,6966	0,2849	-0,4860	-0,1006	-0,0419	1,4
1,3	-0,6571	0,3355	-0,5252	-0,0949	-0,0729	1,3
1,2	-0,5944	0,3899	-0,5614	-0,0858	-0,1091	1,2
1,1	-0,5046	0,4477	-0,5933	-0,0728	-0,1510	1,1
1,0	-0,3838	0,5083	-0,6191	-0,0554	-0,1988	1,0
0,9	-0,2278	0,5712	-0,6370	-0,0329	-0,2527	0,9
0,8	-0,0321	0,6354	-0,6447	-0,0046	-0,3131	0,8
0,7	0,2075	0,6997	-0,6398	0,0300	-0,3798	0,7
0,6	0,4936	0,7628	-0,6198	0,0715	-0,4530	0,6
0,5	0,8366	0,8231	-0,5816	0,1208	-0,5323	0,5
0,4	1,2345	0,8784	-0,5221	0,1782	-0,6174	0,4
0,3	1,6933	0,9267	-0,4370	0,2444	-0,7077	0,3
0,2	2,2162	0,9651	-0,3253	0,3199	-0,8024	0,2
0,1	2,8059	0,9907	-0,1807	0,4059	-0,9003	0,1
0	3,4641	1,0000	0,0000	0,5000	-1,0000	0

Acțiunea încărcării radiale uniform distribuite $\bar{r}$ la marginea superioară.



$$\bar{n}_{0r} = \frac{b}{\delta} \bar{r} \bar{k}_1 \quad \bar{m}_{xr} = b \bar{r} \bar{k}_2 \quad \bar{i}_{xr} = \bar{r} \bar{k}_3$$

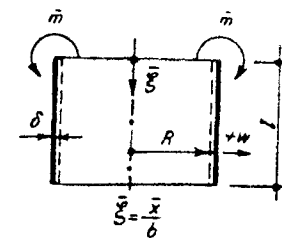
$$D \bar{w}_r = b^3 \bar{r} \bar{k}_4 \quad D \bar{x}_r = b^2 \bar{r} \bar{k}_5$$

$$\bar{m}_{xr, \max} = -0,3224 b \bar{r}, \text{ în secțiunea } \bar{\xi} = 0,7854$$

$$b = \sqrt{\frac{R \delta}{\sqrt{3}}} \quad D = \frac{E \delta^3}{12}$$

$\bar{\xi}$	$\bar{k}_1(\bar{\xi})$	$\bar{k}_2(\bar{\xi})$	$\bar{k}_3(\bar{\xi})$	$\bar{k}_4(\bar{\xi})$	$\bar{k}_5(\bar{\xi})$	$\bar{\xi}$
0	-3,4641	0,0000	1,0000	-0,5000	-0,5000	0
0,1	-3,1188	-0,0903	0,8100	-0,4502	-0,4953	0,1
0,2	-2,7796	-0,1627	0,6398	-0,4012	-0,4825	0,2
0,3	-2,4517	-0,2189	0,4888	-0,3539	-0,4633	0,3
0,4	-2,1387	-0,2610	0,3564	-0,3087	-0,4392	0,4
0,5	-1,8439	-0,2908	0,2415	-0,2661	-0,4115	0,5
0,6	-1,5691	-0,3099	0,1431	-0,2265	-0,3814	0,6
0,7	-1,3157	-0,3199	0,0599	-0,1899	-0,3499	0,7
0,8	-1,0844	-0,3223	-0,0093	-0,1565	-0,3177	0,8
0,9	-0,8755	-0,3185	-0,0658	-0,1264	-0,2856	0,9
1,0	-0,6886	-0,3096	-0,1108	-0,0994	-0,2542	1,0
1,1	-0,5230	-0,2967	-0,1457	-0,0755	-0,2238	1,1
1,2	-0,3781	-0,2807	-0,1716	-0,0546	-0,1949	1,2
1,3	-0,2525	-0,2626	-0,1897	-0,0365	-0,1678	1,3
1,4	-0,1452	-0,2430	-0,2011	-0,0210	-0,1425	1,4
1,5	-0,0547	-0,2226	-0,2068	-0,0079	-0,1192	1,5
1,6	0,0204	-0,2018	-0,2077	0,0030	-0,0980	1,6
1,7	0,0815	-0,1812	-0,2047	0,0118	-0,0788	1,7
1,8	0,1301	-0,1610	-0,1985	0,0188	-0,0617	1,8
1,9	0,1675	-0,1415	-0,1899	0,0242	-0,0466	1,9
2,0	0,1951	-0,1231	-0,1794	0,0282	-0,0334	2,0
2,1	0,2142	-0,1057	-0,1675	0,0309	-0,0219	2,1
2,2	0,2259	-0,0896	-0,1548	0,0326	-0,0122	2,2
2,3	0,2314	-0,0748	-0,1416	0,0334	-0,0040	2,3
2,4	0,2317	-0,0613	-0,1282	0,0335	0,0028	2,4
2,5	0,2278	-0,0491	-0,1149	0,0329	0,0083	2,5
2,6	0,2209	-0,0383	-0,1019	0,0318	0,0127	2,6
2,7	0,2105	-0,0287	-0,0895	0,0304	0,0160	2,7
2,8	0,1985	-0,0204	-0,0777	0,0287	0,0185	2,8
2,9	0,1851	-0,0132	-0,0666	0,0267	0,0201	2,9
3,0	0,1707	-0,0070	-0,0563	0,0246	0,0211	3,0
3,1	0,1559	-0,0019	-0,0469	0,0225	0,0216	3,1
3,2	0,1410	0,0024	-0,0383	0,0203	0,0215	3,2
3,3	0,1262	0,0058	-0,0306	0,0182	0,0211	3,3
3,4	0,1118	0,0085	-0,0237	0,0161	0,0204	3,4
3,5	0,0979	0,0106	-0,0177	0,0141	0,0194	3,5
3,6	0,0849	0,0121	-0,0124	0,0123	0,0183	3,6
3,7	0,0726	0,0131	-0,0079	0,0105	0,0170	3,7
3,8	0,0613	0,0137	-0,0040	0,0088	0,0157	3,8
3,9	0,0509	0,0139	-0,0008	0,0074	0,0143	3,9
4,0	0,0415	0,0139	0,0019	0,0060	0,0129	4,0

Acțiunea momentului uniform distribuit $\bar{m}$ la marginea superioară.



$$\bar{n}_{0m} = \frac{1}{\delta} \bar{m} \bar{i}_1 \quad \bar{m}_{xm} = \bar{m} \bar{i}_2 \quad \bar{i}_{xm} = \frac{1}{b} \bar{m} \bar{i}_3$$

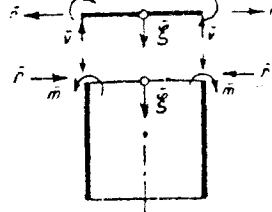
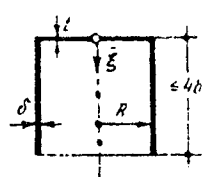
$$D \bar{w}_m = b^2 \bar{m} \bar{i}_4 \quad D \bar{x}_m = b \bar{m} \bar{i}_5$$

$$b = \sqrt{\frac{R \delta}{\sqrt{3}}} \quad D = \frac{E \delta^3}{12}$$

$\bar{\xi}$	$\bar{i}_1(\bar{\xi})$	$\bar{i}_2(\bar{\xi})$	$\bar{i}_3(\bar{\xi})$	$\bar{i}_4(\bar{\xi})$	$\bar{i}_5(\bar{\xi})$	$\bar{\xi}$
0	3,4641	1,0000	0,0000	0,5000	1,0000	0
0,1	2,8059	0,9907	0,1807	0,4059	0,9003	0,1
0,2	2,2162	0,9651	0,3253	0,3199	0,8024	0,2
0,3	1,6933	0,9267	0,4370	0,2444	0,7077	0,3
0,4	1,2345	0,8784	0,5221	0,1782	0,6174	0,4
0,5	0,8366	0,8231	0,5816	0,1208	0,5323	0,5
0,6	0,4956	0,7628	0,6198	0,0715	0,4530	0,6
0,7	0,2075	0,6997	0,6398	0,0300	0,3798	0,7
0,8	-0,0321	0,6354	0,6447	-0,0046	0,3131	0,8
0,9	-0,2278	0,5712	0,6370	-0,0329	0,2527	0,9
1,0	-0,3838	0,5083	0,6191	-0,0554	0,1988	1,0
1,1	-0,5046	0,4477	0,5933	-0,0728	0,1510	1,1
1,2	-0,5944	0,3899	0,5614	-0,0858	0,1091	1,2
1,3	-0,6571	0,3355	0,5252	-0,0949	0,0729	1,3
1,4	-0,6966	0,2849	0,4860	-0,1006	0,0419	1,4
1,5	-0,7163	0,2384	0,4451	-0,1034	0,0158	1,5
1,6	-0,7195	0,1959	0,4036	-0,1039	-0,0059	1,6
1,7	-0,7091	0,1576	0,3623	-0,1024	-0,0235	1,7
1,8	-0,6877	0,1234	0,3220	-0,0993	-0,0376	1,8
1,9	-0,6578	0,0932	0,2831	-0,0950	-0,0484	1,9
2,0	-0,6214	0,0667	0,2461	-0,0897	-0,0563	2,0
2,1	-0,5803	0,0439	0,2114	-0,0838	-0,0618	2,1
2,2	-0,5362	0,0244	0,1792	-0,0774	-0,0652	2,2
2,3	-0,4904	0,0080	0,1495	-0,0708	-0,0668	2,3
2,4	-0,4440	-0,0056	0,1226	-0,0641	-0,0669	2,4
2,5	-0,3980	-0,0166	0,0983	-0,0575	-0,0658	2,5
2,6	-0,3531	-0,0254	0,0766	-0,0510	-0,0636	2,6
2,7	-0,3100	-0,0320	0,0574	-0,0448	-0,0608	2,7
2,8	-0,2691	-0,0369	0,0407	-0,0388	-0,0573	2,8
2,9	-0,2307	-0,0403	0,0263	-0,0333	-0,0534	2,9
3,0	-0,1951	-0,0423	0,0141	-0,0282	-0,0493	3,0
3,1	-0,1624	-0,0431	0,0037	-0,0234	-0,0450	3,1
3,2	-0,1327	-0,0431	-0,0048	-0,0192	-0,0407	3,2
3,3	-0,1060	-0,0422	-0,0116	-0,0153	-0,0364	3,3
3,4	-0,0822	-0,0408	-0,0171	-0,0119	-0,0323	3,4
3,5	-0,0613	-0,0389	-0,0212	-0,0089	-0,0283	3,5
3,6	-0,0430	-0,0366	-0,0242	-0,0062	-0,0245	3,6
3,7	-0,0273	-0,0341	-0,0262	-0,0039	-0,0210	3,7
3,8	-0,0139	-0,0314	-0,0274	-0,0020	-0,0177	3,8
3,9	-0,0027	-0,0286	-0,0278	-0,0004	-0,0147	3,9
4,0	0,0065	-0,0258	-0,0277	0,0009	-0,0120	4,0

peris flexibilă

Jos: condiții de margine oarecare



$$C_1 = 1 + \frac{R\delta^3}{b l^3}$$

$$C_2 = \delta + \frac{R\delta^3}{b^3 l}$$

$$C_3 = \frac{R^3 \delta^3}{b^3 l^3}$$

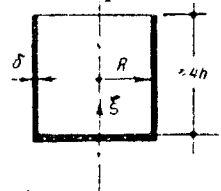
Schema de încărcare		$\bar{r}$	$\bar{m}$	$\bar{v}$
Împingerea apei		0	0	0
		$\frac{3}{2} \gamma b^2 \frac{1}{C_1 C_2 - 3}$	$\frac{1}{4} \gamma b^3 \frac{C_2}{C_1 C_2 - 3}$	—
Încărcare uniform distribuită		0	0	$\frac{1}{2} p R$
		$-\frac{3}{4} p b \frac{C_3}{C_1 C_2 - 3}$	$-\frac{1}{8} p b^2 \frac{C_2 C_3}{C_1 C_2 - 3}$	$\frac{1}{2} p R$

Reacțiuni la contactul perete cilindric – placă rigidă la bază.

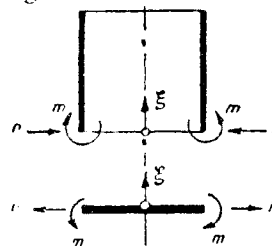
Anexa 6.6

Placă de bază rigidă

Sus: condiții de margine oarecare

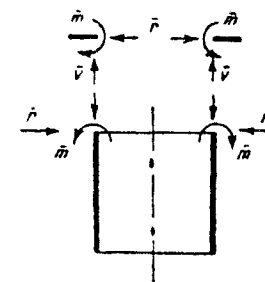
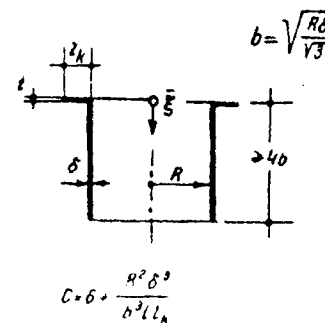


$$b = \sqrt{\frac{R\delta}{\sqrt{3}}}$$



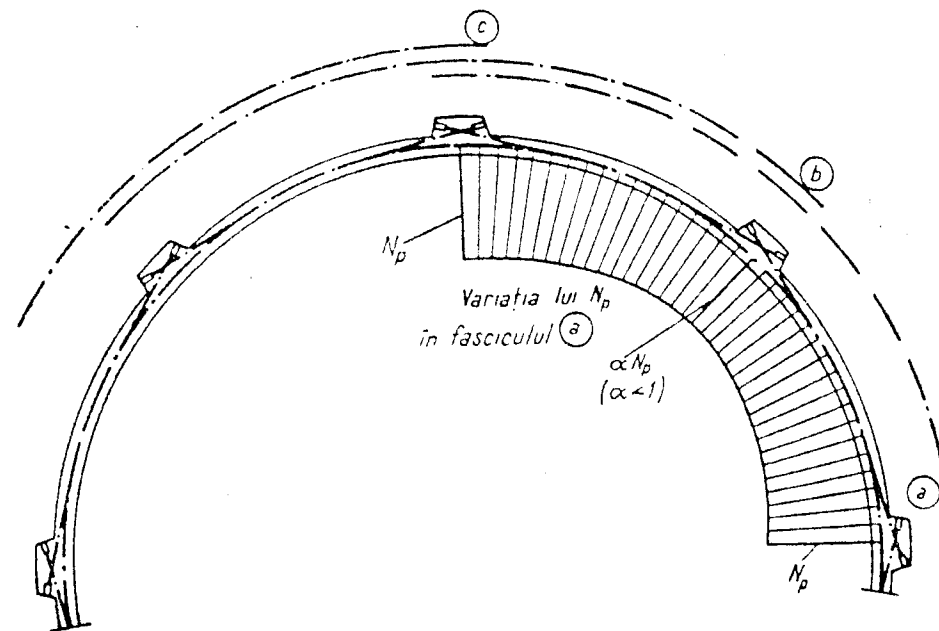
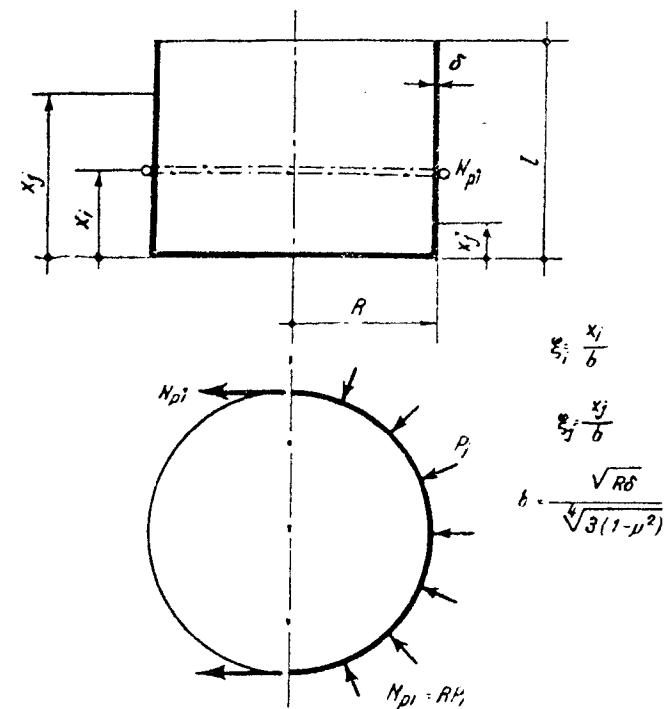
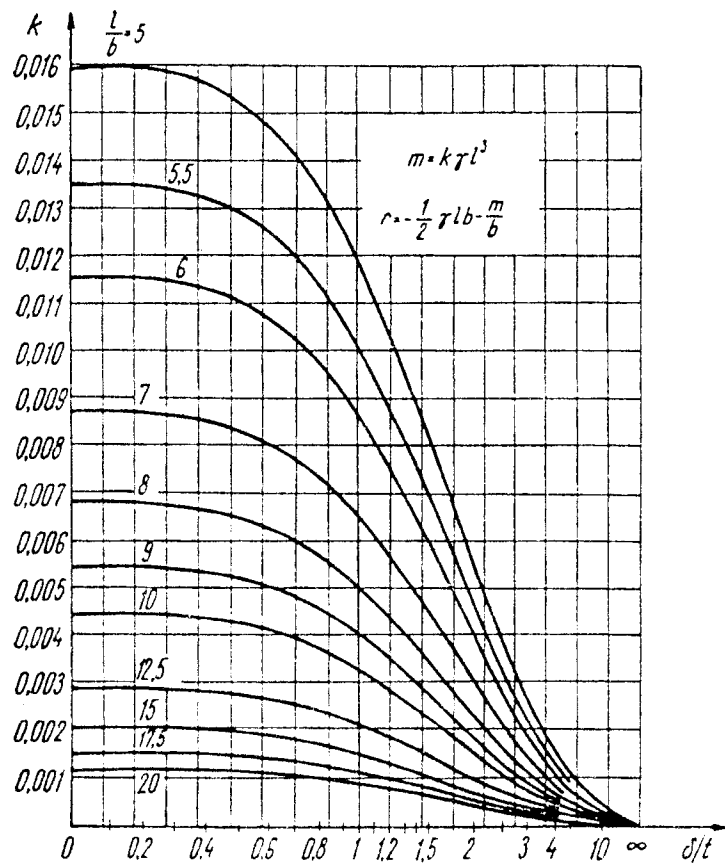
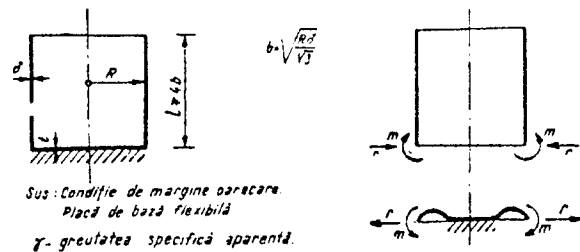
Schema de încărcare		r	m
Împingerea apei		$\frac{1}{2} \gamma b h_a$	0
		$\frac{1}{2} \gamma b^2 \left(2 \frac{h_a}{b} - 1 \right)$	$\frac{1}{2} \gamma b^3 \left(\frac{h_a}{b} - 1 \right)$

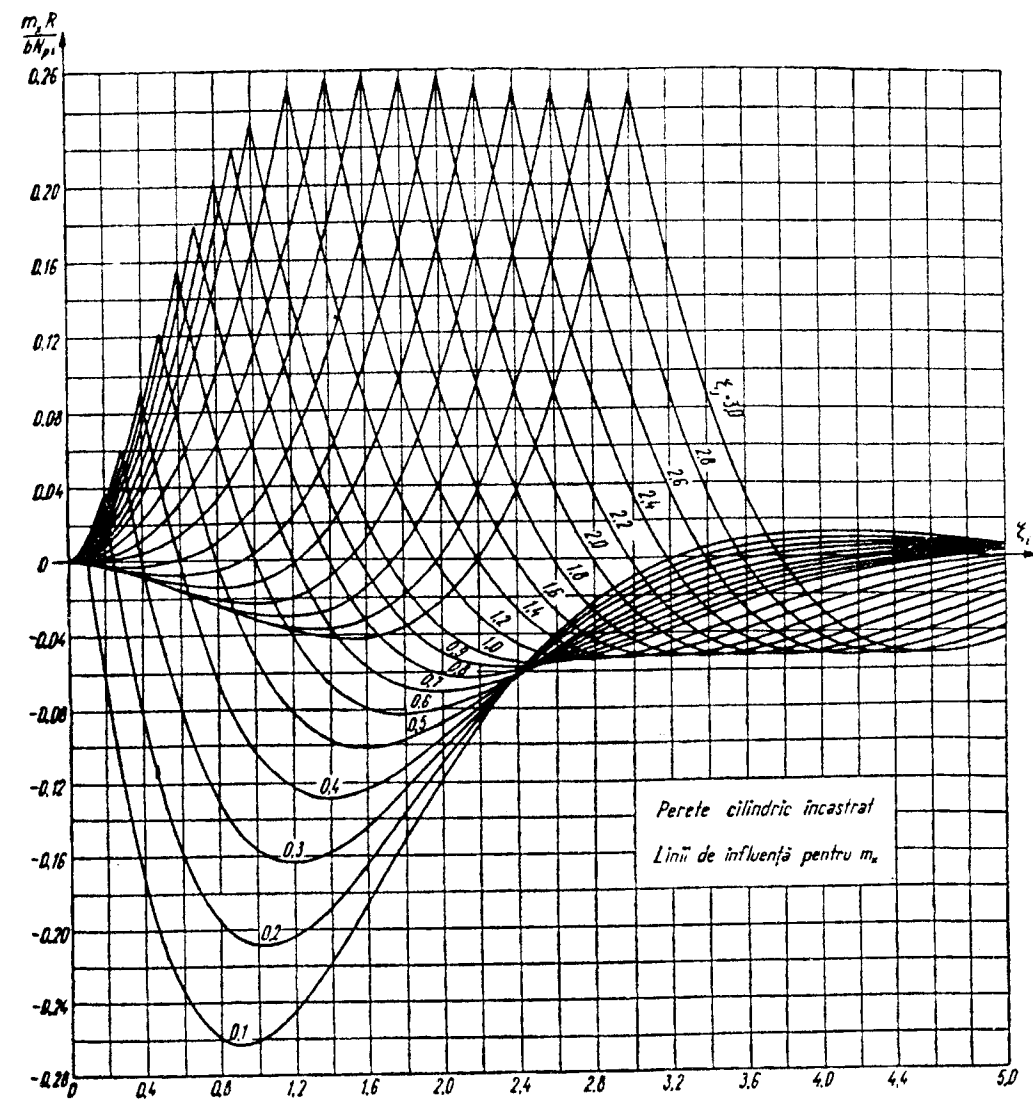
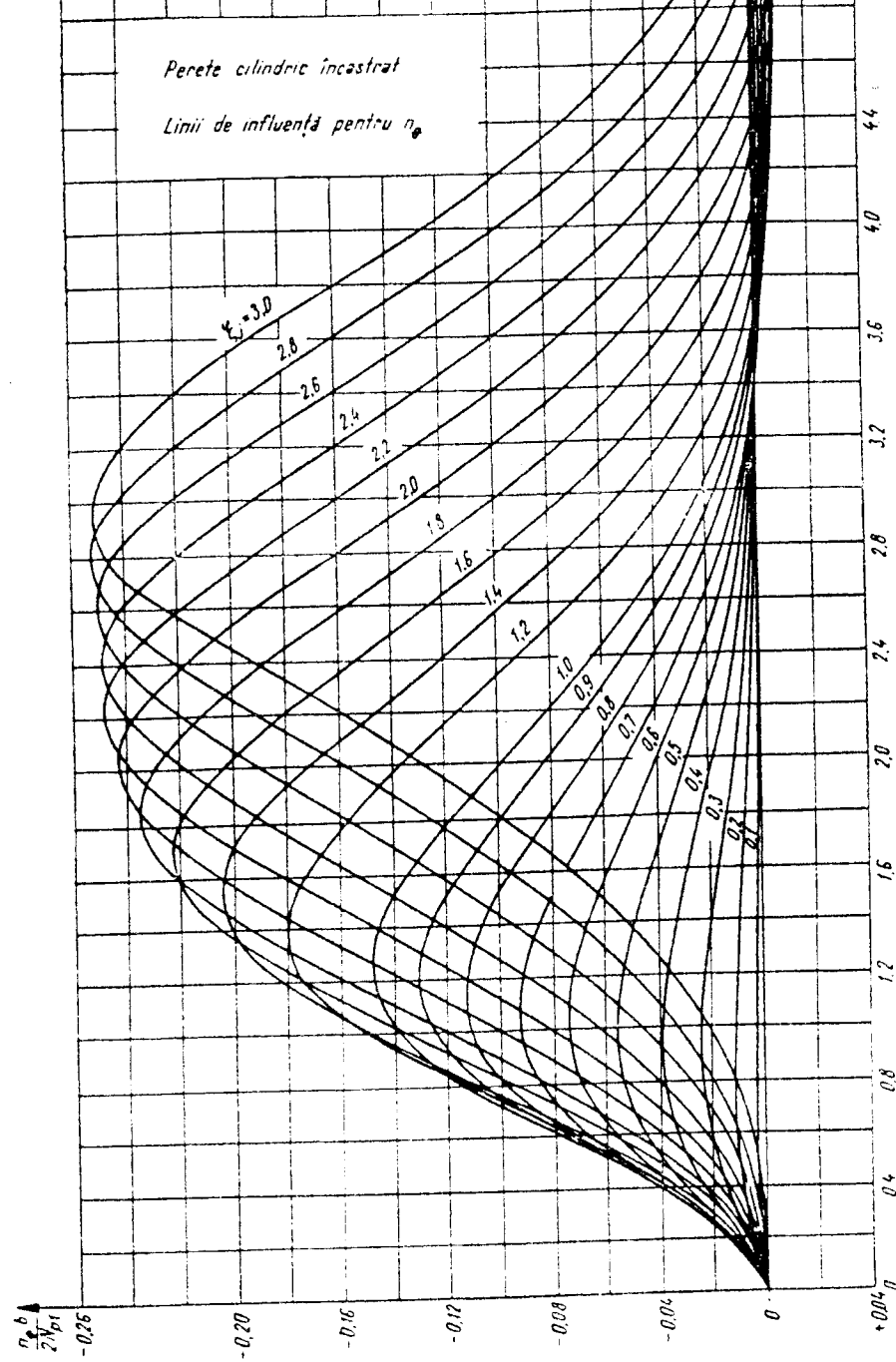
Reacțiuni la contactul perete cilindric – placă inelară exterioară la marginea superioară a rezervorului.

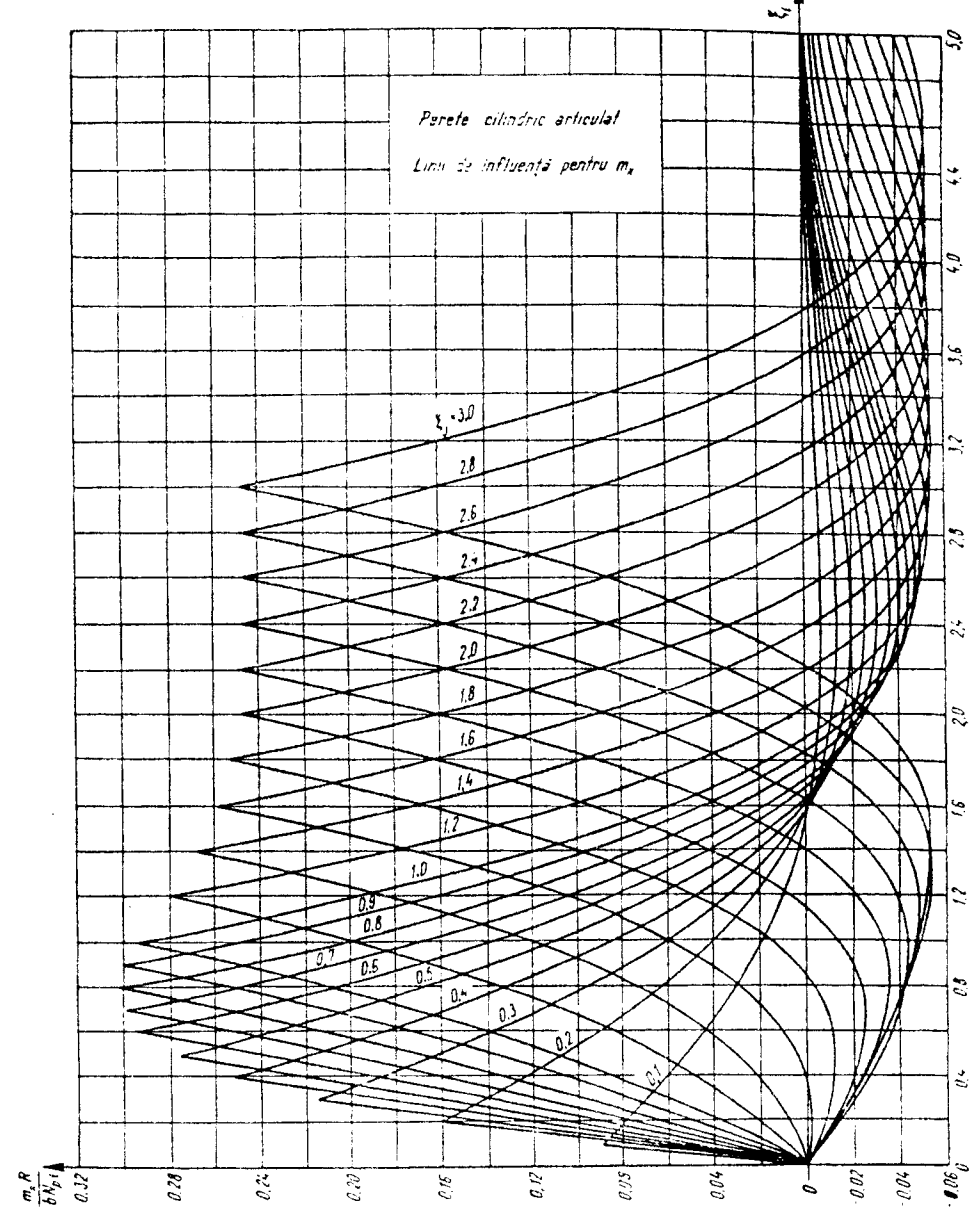
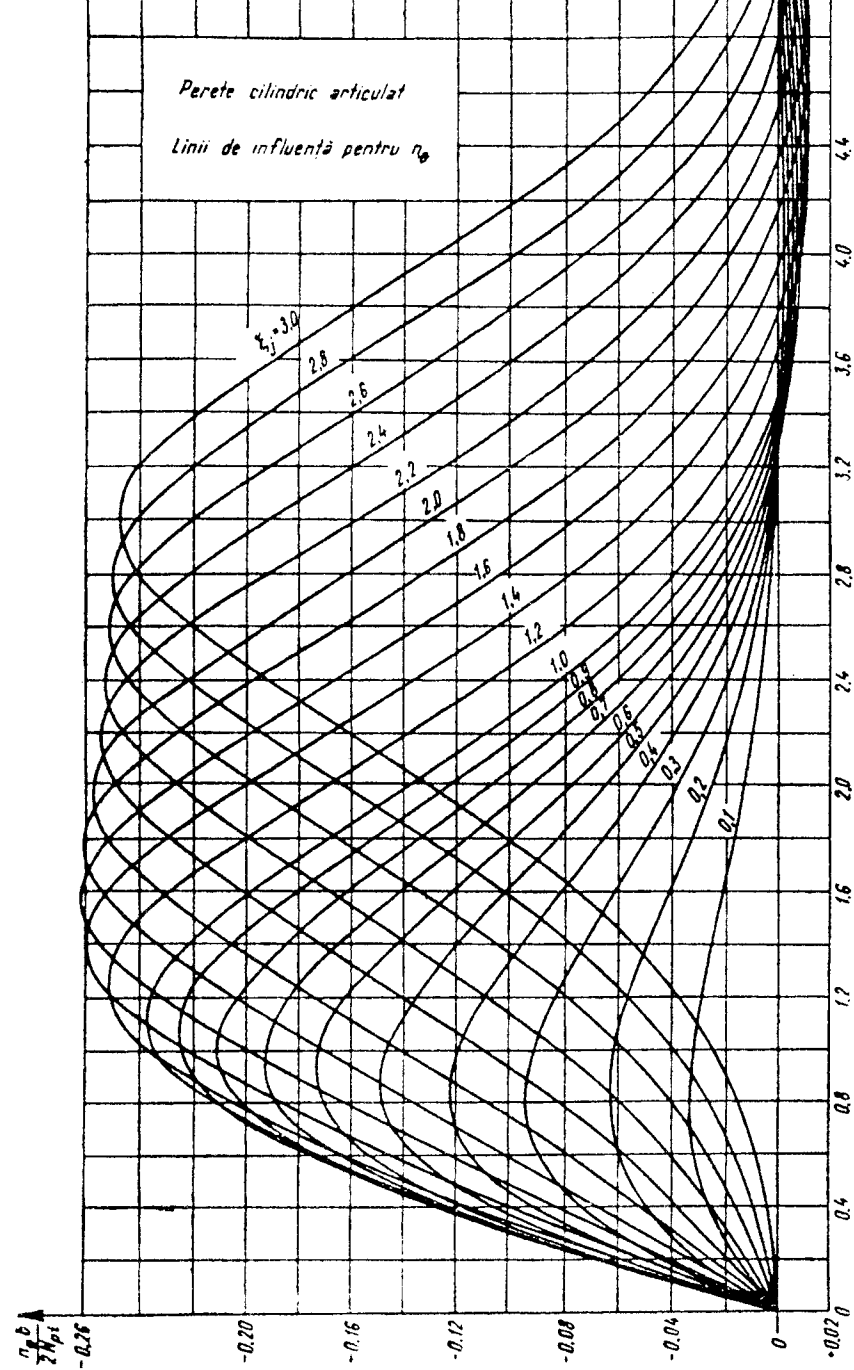


$$C = 6 + \frac{R^2 \delta^3}{b^3 l l_k}$$

Schema de încărcare		$\bar{r}$	$\bar{m}$	$\bar{v}$
		0	0	0
		$\frac{6}{bC} \bar{m}$	$\frac{1}{2} P_k l_k^2 \left(1 + \frac{l_k}{2R} \right)$	$P_k l_k \left(1 + \frac{l_k}{2R} \right)$
		$\frac{6}{bC} \bar{m}$	$f_k l_k \left(1 + \frac{l_k}{R} \right)$	$f_k \left(1 + \frac{l_k}{R} \right)$
		$\frac{6}{bC} \bar{m}$	$m_k \left(1 + \frac{l_k}{R} \right)$	0

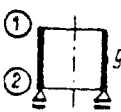
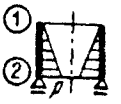
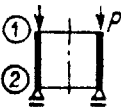
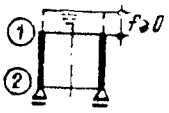
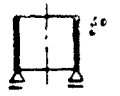






STABILIREA RIGIDITĂȚILOR "REALE" pentru calculul eforturilor produse de variațiile de temperatură

Cazul	Rigiditatea axială D^*	Rigiditatea la încovoiere B^*	Domeniul de utilizare
1	$D^* = E_b h$	$B^* = E_b h^3 / 12 (1 - \mu^2)$	Plăci curbe realizate din materiale ideal elastice
2	$E_a A_a^{(N)} / \psi_N$	$B^* = E_a A_a \beta h_0^2 / \psi$ $\psi = 1 - (1 - \sqrt{2}) \cdot 0,10 / (\mu^3 + 0,2)$ $\beta = (1 - \xi_2 / 3) (1 - \xi_2)$ $\xi_2 = n\mu [(1 + 2 / (n\mu^2))^{0,5} - 1]$	Plăci curbe realizate din beton armat, în stare fisurată
3	$0,85 E_b h / (1 + 0,5 \varphi)$	$B^* = E_a A_a \beta h_0^2 / \psi$ Valorile ψ, β, ξ_2 ca la punctul anterior	Plăci curbe realizate din beton armat precomprimat pe o singură direcție (precomprimare orizontală), fisurate pe generatoare
4	$0,85 E_b h / (1 + 0,5 \varphi)$	$B^* = 0,85 E_b h^3 / [12 (1 + 0,5 \varphi)]$	Plăci curbe realizate din beton armat precomprimat pe ambele direcții
5	$E_b h$	$B^* = 0,5 E_b h W_f (1 - \xi_1)$ $W_f = (0,292 + 1,5 n\mu^*) b h^2$ $\xi_1 = (1 + 2 n\mu^*) / [2 (1 + n\mu^*)]$	Plăci curbe din beton armat în stare nefisurată

	Schema de încărcare	Q_x	n_{x0}	$n_{\theta 0}$	$\Delta_0 = u_0$	v_0
Gîră proprie		$2R\pi g x$	$-gx$	0	$\mu \frac{Rg}{E\delta} x$	$-\mu \frac{Rg}{E\delta}$
Încărcare radială		0	0	$\frac{Rp}{l} x$	$\frac{R^2 p}{E\delta l} x$	$-\frac{R^2 p}{E\delta l}$
Încărcare înclără		$2R\pi P$	$-P$	0	$\mu \frac{RP}{E\delta}$	0
Încărcare cu apă		0	0	$\gamma R (f+x)$	$\frac{\gamma R^2}{E\delta} (f+x)$	$-\frac{\gamma R^2}{E\delta}$
Variație uniformă de temperatură		0	0	0	$\alpha_l t R$	0

Q_x — suma încărcărilor deasupra nivelului x

VALORILE ADMISIBILE PENTRU DESCHIDEREA FISURILOR ȘI A EFORTURILOR REMANENTE DE COMPRESIUNE ÎN PEREȚII REZERVOARELOR CILINDRICE

Regimul de solicitare; starea limită	Agresivitatea mediului conform C 170 - 83	Deschiderea medie admisibilă a fisurilor (în mm) la recipienti de beton armat		Eforturi remanente (N/mm^2) în perete și rosturi la recipienti din beton precomprimat
		La elementele solicitate la întindere centrică sau întindere excentrică cu mică excentricitate	În celelalte cazuri	
static; starea limită de exploatare normală (curentă)	foarte slabă și slabă;	0,10	0,20	1,00
	medie și puternică	0,05	0,15	
dinamic (seismic); starea limită de exploatare normală	indiferent de agresivitate	0,15	0,25	0,30

Notă: În cazul utilizării membranelor etanșe, deschiderea fisurilor se consideră conform STAS 10107/0-90.

6.4. CALCULUL REZERVOARELOR CILINDRICE SPECIALE

Se detaliază elementele prezentate în /3/, în formulare clasică după o analiză atentă, conform elementelor suplimentare din ANEXA VI.

Secțiunile elementelor componente ale construcțiilor industriale și clădirilor civile, respectiv ale unor structuri speciale se dimensionează la **rezistență** după metoda stărilor limită.

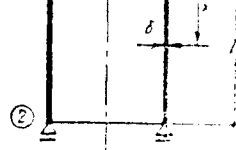
În prima stare limită atinsă în beton (I_b) se dezvoltă deformații plastice și continuitatea acestuia se întrerupe, adică apar fisuri. În continuare, în stadiul II, în armătura întinsă se atinge **rezistența de calcul**, care se apropie de limita de curgere sau de rezistența limită a oțelului, funcție de mărimea încărcării exterioare.

Cu toate acestea, eforturile interioare M , N și Q (T), la care se dimensionează secțiunea, în cele mai multe cazuri, la construcțiile static nedeterminate din BA/BP, se determină după metodele mecanicii construcțiilor în domeniul elastic.

Deoarece rezervoarele pot fi asimilate cu structuri elastice, la care apariția fisurilor în exploatare nu este permisă, calculul static al acestora trebuie efectuat în **stadiul elastic la întindere**.

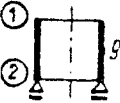
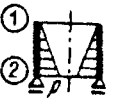
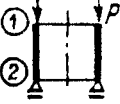
Calculul rezervoarelor trebuie să se dezvolte cu considerarea următoarelor **cazuri de încărcare**:

- 1) rezervorul plin cu apă, fără împingerea pământului (la încercarea de etanșeitate);
- 2) rezervorul gol, la împingerea statică a pământului;
- 3) rezervorul umplut parțial sau plin și împingerea pământului; în afară de acestea, construcțiile pot fi supuse la **încărcări neuniforme**, variații de temperatură sau însoleiere asimetrică;
- 4) acțiunea seismică convențională, definită pentru amplasamentul respectiv, considerând interacțiunea structură – lichid.



Placă cilindrică subțire cu grosime constantă.
Eforturi sectionale în "starea de membrană".

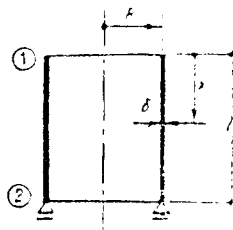
Anexa 6.10

	Schema de încărcare	Q_x	n_{x0}	$n_{\theta 0}$	$\Delta_0 = u_0$	κ_0
Cărci proprii		$2R\pi g x$	$-gx$	0	$\mu \frac{Rg}{E\delta} x$	$-\mu \frac{Rg}{E\delta}$
Încărcare radială		0	0	$\frac{Rp}{l} x$	$\frac{R^2 p}{E\delta l} x$	$-\frac{R^2 p}{E\delta l}$
Încărcare înelară		$2R\pi P$	$-P$	0	$\mu \frac{RP}{E\delta}$	0
Încărcare cu apă		0	0	$\gamma R (f+x)$	$\frac{\gamma R^2}{E\delta} (f+x)$	$-\frac{\gamma R^2}{E\delta}$
Variație uniformă de temperatură		0	0	0	$\alpha_t t R$	0

Q_x — suma încărcărilor deasupra nivelului x

STABILIREA RIGIDITĂȚILOR "REALE" pentru calculul eforturilor produse de variațiile de temperatură

Cazul	Rigiditatea axială D^*	Rigiditatea la încovoiere B^*	Domeniul de utilizare
1	$D^* = E_b h$	$B^* = E_b h^3 / 12 (1 - \mu^2)$	Plăci curbe realizate din materiale ideal elastice
2	$E_a A_a^{(N)} / \psi_N$	$B^* = E_a A_a \beta h_0^2 / \psi$ $\psi = 1 - (1 - \nu/2) \cdot 0,10 / (\mu^3 + 0,2)$ $\beta = (1 - \xi_2 / 3) (1 - \xi_2)$ $\xi_2 = \eta \mu [(1 + 2 / (\eta \mu^2))^{0,5} - 1]$	Plăci curbe realizate din beton armat, în stare fisurată
3	$0,85 E_b h / (1 + 0,5 \varphi)$	$B^* = E_a A_a \beta h_0^2 / \psi$ Valorile ψ, β, ξ_2 ca la punctul anterior	Plăci curbe realizate din beton armat precomprimat pe o singură direcție (precomprimare orizontală), fisurate pe generatoare
4	$0,85 E_b h / (1 + 0,5 \varphi)$	$B^* = 0,85 E_b h^3 / [12 (1 + 0,5 \varphi)]$	Plăci curbe realizate din beton armat precomprimat pe ambele direcții
5	$E_b h$	$B^* = 0,5 E_b h W_f (1 - \xi_1)$ $W_f = (0,292 + 1,5 \eta \mu^*) b h^2$ $\xi_1 = (1 + 2 \eta \mu^*) / [2 (1 + \eta \mu^*)]$	Plăci curbe din beton armat în stare nefisurată



Placă cilindrică subțire cu grosime constantă.
Eforturi sectionale în "starea de membrană".

Anexa 6.10

	Schema de încărcare	Q_x	n_{x0}	$n_{\theta 0}$	$\Delta_0 = u_0$	χ_0
Circulație proprie		$2R\pi g x$	$-gx$	0	$\mu \frac{Rg}{E\delta} x$	$-\mu \frac{Rg}{E\delta}$
Încărcare radială		0	0	$\frac{Rp}{l} x$	$\frac{R^2 p}{E\delta l} x$	$-\frac{R^2 p}{E\delta l}$
Încărcare înclătă		$2R\pi P$	$-P$	0	$\mu \frac{RP}{E\delta}$	0
Încărcare cu apă		0	0	$\gamma R (f+x)$	$\frac{\gamma R^2}{E\delta} (f+x)$	$-\frac{\gamma R^2}{E\delta}$
Variație uniformă de temperatură		0	0	0	$\alpha_t t R$	0

Q_x — suma încărcărilor deasupra nivelului x

Cap. 6. Elemente privind calculul rezervoarelor cilindrice

Anexa 7

STABILIREA RIGIDITĂȚILOR "REALE" pentru calculul eforturilor produse de variațiile de temperatură

Cazul	Rigiditatea axială D^*	Rigiditatea la încovoiere B^*	Domeniul de utilizare
1	$D^* = E_b h$	$B^* = E_b h^3 / 12 (1 - \mu^2)$	Plăci curbe realizate din materiale ideal elastice
2	$E_a A_a^{(N)} / \psi_N$	$B^* = E_a A_a \beta h_0^2 / \psi$ $\psi = 1 - (1 - \nu/2) \cdot 0,10 / (\mu^3 + 0,2)$ $\beta = (1 - \xi_2 / 3) (1 - \xi_2)$ $\xi_2 = n\mu [(1 + 2 / (n\mu^2))^{0,5} - 1]$	Plăci curbe realizate din beton armat, în stare fisurată
3	$0,85 E_b h / (1 + 0,5 \varphi)$	$B^* = E_a A_a \beta h_0^2 / \psi$ Valorile ψ , β , ξ_2 ca la punctul anterior	Plăci curbe realizate din beton armat precomprimat pe o singură direcție (precomprimare orizontală), fisurate pe generatoare
4	$0,85 E_b h / (1 + 0,5 \varphi)$	$B^* = 0,85 E_b h^3 / [12 (1 + 0,5 \varphi)]$	Plăci curbe realizate din beton armat precomprimat pe ambele direcții
5	$E_b h$	$B^* = 0,5 E_b h W_f (1 - \xi_1)$ $W_f = (0,292 + 1,5 n\mu^*) b h^2$ $\xi_1 = (1 + 2 n\mu^*) / [2 (1 + n\mu^*)]$	Plăci curbe din beton armat în stare nefisurată

6.4.1. CALCULUL PEREȚILOR REZERVOARELOR CILINDRICE LA ÎNCĂRCĂRI AXIAL SIMETRICE

Se consideră cazul **peretelui cilindric cu grosime variabilă** încărcat axial simetric (fig. 6.18), în cazul general.

Din condițiile de echilibru după direcția axei Z a unui element infinit mic de perete, definit de două secțiuni meridiane ce formează unghiul $d\psi$ și de două secțiuni paralele la distanțele x și $x + dx$, rezultă:

$$(6.104) \quad \left. \begin{aligned} \frac{dQ}{dx} + \frac{T_2}{R_0} - Z = 0 \\ \frac{dM_1}{dx} - Q = 0 \end{aligned} \right\} \rightarrow Q = \frac{dM_1}{dx}$$

în care:

- R_0 - raza de curbură a suprafeței mediane a peretelui cilindric;
- x - distanța considerată de la un punct oarecare la marginea superioară a peretelui;
- Q - forța tăietoare în secțiunea perpendiculară pe suprafața cilindrului;
- T_2 - forța axială inelară;
- M_1 - moment încovoietor după meridian;
- Z - componenta normală a încărcării exterioare pe suprafețele meridiane ale pânzei.

Cele două ecuații ale sistemului (6.104) conțin trei necunoscute: T_2 , Q și M_1 ; pentru ridicarea nedeterminării statice se consideră deformațiile plăcii cilindrice. Alungirea relativă a suprafeței mediane a plăcii cilindrice pe direcția inelară față de variația mărimii w în direcție radială:

$$(6.105) \quad \varepsilon_2 = \frac{2\pi(R_0 + w) - 2\pi R_0}{2\pi R_0} = \frac{w}{R_0}$$

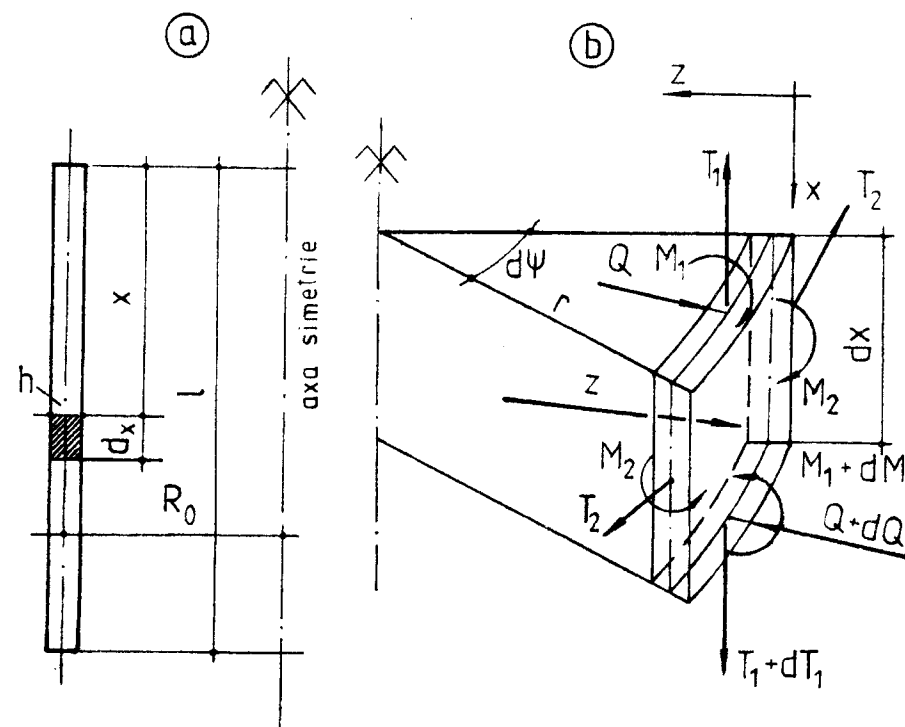


Fig. 6.18. Elemente necesare în deducerea ecuațiilor de echilibru al plăcilor cilindrice: a – secțiunea verticală a peretelui cilindric; b – forțele și momentele ce acționează pe un element infinitesimal aparținând plăcii subțiri.

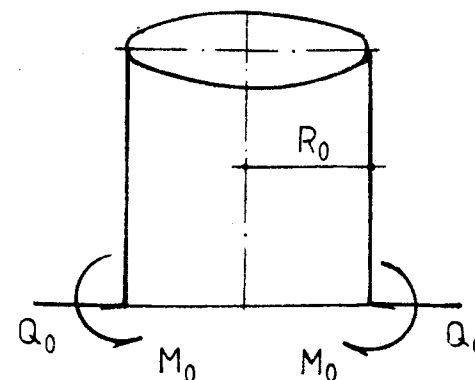


Fig. 6.19. Schemă necesară în stabilirea coeficienților a_{11} , $a_{12} = a_{21}$ și a_{22} .

Curbura suprafeței mediane a plăcii sub deplasarea/translarea w cu valori mici se exprimă aproximativ cu relația:

$$(6.106) \quad \chi_1 = -\frac{d^2 w}{dx^2}$$

De aici rezultă T_2 și M_1 , conform legii Hooke:

$$(6.107) \quad \begin{cases} T_2 = -Eh \frac{w}{R_0} \\ M_1 = -D \frac{d^2 w}{dx^2} \end{cases}$$

în care $D = \frac{E \cdot h^3}{12}$ reprezintă rigiditatea plăcii la încovoiere, pentru coeficientul lui Poisson cu valoarea zero.

Eliminând din sistemul de ecuații (6.104) forța tăietoare Q , obținem:

$$(6.108) \quad \frac{d^2 M_1}{dx^2} + \frac{T_2}{R_0} - Z = 0$$

Înlocuind în (6.108) influența (6.107), rezultă:

$$(6.109) \quad \frac{d^2}{dx^2} \left(D \frac{d^2 w}{dx^2} \right) + \frac{Eh}{R_0^2} w + Z = 0$$

Ecuația obținută (6.109) reprezintă ecuația de bază ce permite rezolvarea plăcilor cilindrice axial simetrice, încărcate axial simetric, cu **grosimea peretelui variabilă după o lege** cunoscută.

În cele mai multe cazuri peretele cilindric are o grosime constantă și devine utilă și analiza acestui caz.

6.4.1.1. PERETE CU GROSIME CONSTANTĂ

Prin grosimea constantă h a peretelui cilindric, ecuația (6.109) este similară cu ecuația încovoierii barelor cu rigiditate constantă în domeniul elastic. Pentru $D = \text{constant}$, ecuația (6.109) devine:

$$(6.110) \quad \frac{d^4 w}{dx^4} + \frac{Eh}{h^2 R_0^2} w = -\frac{Z}{Eh^3};$$

Pentru a rezolva (6.110) se introduce o nouă necunoscută ¹⁾ (a se urmări detaliile date în ANEXA VI)

$$(6.111) \quad \varphi = \frac{x}{S},$$

$$\text{în care} \quad \frac{1}{4} \cdot S^4 = \frac{h^2 R_0^2}{12} \quad \text{sau} \quad S = 0,76 \sqrt{h \cdot R_0}.$$

Ecuația (6.110) cu noua necunoscută devine:

$$\frac{d^4 w}{d\varphi^4} \cdot \frac{1}{S^4} + \frac{12}{h^2 R_0^2} w = -\frac{12 \cdot Z}{Eh^3};$$

$$\frac{d^4 w}{d\varphi^4} \cdot \frac{3}{h^2 R_0^2} + \frac{12}{h^2 R_0^2} w = -\frac{12 \cdot Z}{Eh^3} \cdot \frac{h^2 R_0^2}{3};$$

$$(6.112) \quad \frac{d^4 w}{d\varphi^4} + 4w = -\frac{4R_0^2}{Eh} \cdot Z$$

Ecuția (6.112) reprezintă o ecuație diferențială neomogenă de ordinul 4 cu coeficienți constanți. După cum este cunoscut, soluția generală ²⁾ a ecuației neomogene este suma dintre soluția generală a ecuației omogene corespunzătoare

$$(6.113) \quad \frac{d^4 w}{d\varphi^4} + 4w = 0 \quad \text{și o soluție particulară a ecuației neomogene considerate.}$$

În continuare se va determina soluția corespunzătoare stării de membrană a plăcii, fără momente încovoietoare.

Pentru **încărcări hidrostactice** $Z = \gamma x$ (unde γ - greutatea specifică a lichidului; x - distanța de la marginea superioară a peretelui la secțiunea orizontală considerată), în **stare de membrană**,

$$(6.114) \quad w_0 = \frac{T_{20} \cdot R_0}{Eh}; \quad T_{20} = \gamma R_0 \cdot x$$

Soluția generală a ecuației (6.113) are forma:

$$(6.114.a) \quad w = c_1 \cdot \eta_1 + c_2 \cdot \eta_2 + c_3 \cdot \bar{\eta}_1 + c_4 \cdot \bar{\eta}_2,$$

în care $c_1, \dots, c_4$ sunt constante de integrare și

$$(6.115) \quad \begin{cases} \eta_1 = e^{-\varphi} \cos \varphi \\ \eta_2 = e^{-\varphi} \sin \varphi \end{cases} \quad \begin{cases} \bar{\eta}_1 = e^{\varphi} \cos \varphi \\ \bar{\eta}_2 = e^{\varphi} \sin \varphi \end{cases}$$

în care e reprezintă baza logaritmilor naturali.

Dacă distanța între extremitățile pânzei este suficient de mare, astfel încât încărcarea pe o margine a pânzei nu influențează deformațiile și tensiunile din extremitatea opusă, adică pentru $l/s \geq 2,5$, înălțimea l a peretelui poate fi considerată cu lungime infinită.

La pereții cilindrici ai rezervoarelor această condiție, este satisfăcută, în cele mai multe cazuri, adică (6.114.a) se poate considera sub forma:

$$(6.116) \quad w = c_1 \cdot \eta_1 + c_2 \cdot \eta_2$$

În aceste condiții, momentul încovoietor M_1 , forța tăietoare Q , forța axială inelară T_2 și unghiul de rotire ϑ devin:

$$(6.117) \quad \begin{cases} T_2 = -\frac{Eh}{R_0}(c_1 \cdot \eta_1 + c_2 \cdot \eta_2); \\ \vartheta = \frac{dw}{dx} = \frac{dw}{d\varphi} \cdot \frac{1}{S} = \frac{1}{S} [c_1(-\eta_1 - \eta_2) + c_2(-\eta_2 + \eta_1)] \\ M_1 = -D \frac{d^2 w}{d\varphi^2} \cdot \frac{1}{S^2} = -\frac{2D}{S^2}(c_1 \cdot \eta_2 - c_2 \cdot \eta_1); \\ Q = -D \frac{d^3 w}{d\varphi^3} \cdot \frac{1}{S^3} = -\frac{2D}{S^3} [c_1(\eta_1 - \eta_2) + c_2(\eta_1 + \eta_2)] \end{cases}$$

Determinând coeficienții c_1, c_2 din condițiile de margine și înlocuindu-i în relațiile (6.117) și (6.116), se stabilesc eforturile interioare corespunzătoare și deplasările în orice punct al pânzei.

Astfel, considerând pentru început mărimea φ pentru **marginea inferioară** a plăcii, încărcată cu momentul încovoietor M_0 , se obține:

$$(6.118) \quad \begin{cases} M_1(\varphi = 0) = M_0 = \frac{2D}{S^2} \cdot c_2; \\ Q(\varphi = 0) = 0 = \frac{2D}{S^3} (c_1 + c_2) \\ \text{adică : } c_{1M} = -\frac{M_0 S^2}{2D}; c_{2M} = \frac{M_0 S^2}{2D} \end{cases}$$

Înlocuind (6.118) în relațiile (6.116) și (6.117) rezultă:

$$(6.119) \quad \begin{cases} w = \frac{M_0 S^2}{2D} (-\eta_1 + \eta_2); \\ g = \frac{M_0 S}{D} \cdot \eta_1; \\ T_2 = \frac{2M_0 R_0}{S^2} (\eta_1 - \eta_2); \\ M_1 = M_0 (\eta_1 + \eta_2); \\ Q = -\frac{2M_0}{S} \cdot \eta_2. \end{cases}$$

în care D - multiplu al mărimilor din primele două expresii din (6.119); pentru $M_0 = 1$ și $\varphi = 0$ se numesc coeficienți de influență ai deformațiilor elastice ale marginii.

Aceste mărimi se folosesc în calculul pânzelor legate cu inele, plăci plane sau alte plăci de rotație.

Ele capătă următorul aspect:

$$(6.120) \quad \begin{cases} a_{11} = D \cdot g(\varphi = 0) = S; \\ a_{12} = D \cdot w(\varphi = 0) = -\frac{S^2}{2}. \end{cases}$$

Se determină coeficienții de integrare pentru încărcarea marginii pânzei cu forța tăietoare Q_0 , adică:

$$(6.121) \quad \begin{cases} M_1(\varphi = 0) = 0 = \frac{2D}{S^2} \cdot c_2; \\ c_{2Q} = 0; \\ Q(\varphi = 0) = -Q_0 = -\frac{2D}{S^3} \cdot c_1; \\ c_{1Q} = \frac{Q_0 \cdot S^3}{2D}. \end{cases}$$

Înlocuind c_{1Q} și c_{2Q} din (6.121) în formulele (6.116) și (6.117), se determină eforturile interioare ³⁾ și deplasările în orice punct al pânzei:

$$(6.122) \quad \begin{cases} w = \frac{Q_0 \cdot S^3}{2D} \cdot \eta_1; \\ g = -\frac{Q_0 \cdot S^2}{2D} (\eta_1 + \eta_2); \\ T_2 = -\frac{2Q_0 \cdot R_0}{S} \cdot \eta_1; \\ M_1 = -Q_0 \cdot S \cdot \eta_2; \\ Q = -Q_0 (\eta_1 - \eta_2). \end{cases}$$

Cap. 6. Elemente privind calculul rezervoarelor cilindrice

D este multiplul mărimilor din primele două expresii (6.122); pentru $Q_0 = 1$ și $\varphi = 0$ se numesc coeficienții de influență ai deformației elastice a plăcii cilindrice și se exprimă sub forma:

$$(6.123) \quad \begin{cases} a_{22} = D \cdot w(\varphi = 0) = \frac{S^3}{2}; \\ a_{21} = D \cdot \vartheta(\varphi = 0) = -\frac{S^2}{2}. \end{cases}$$

Astfel, a_{11} reprezintă unghiul de rotire a marginii plăcii multiplicat cu D sub momentul zonal $M_0 = 1$ pe direcția acestui moment; a_{12} reprezintă deplasarea marginii plăcii multiplicată cu D sub acțiunea momentului zonal $M_0 = 1$ pe direcția efortului Q_0 .

Această mărime poate fi pozitivă sau negativă. În fig. 6.19 sunt indicate direcțiile de acțiune pentru M_0 și Q_0 când a_{12} este pozitiv; a_{22} reprezintă deplasarea marginii plăcii multiplicată cu D sub acțiunea forței tăietoare zonale $Q_0 = 1$ pe direcția acestei forțe; a_{21} este unghiul de rotire pe direcția efortului M_0 sub forța tăietoare zonală $Q_0 = 1$, multiplicat cu D.

În anumite cazuri ale pereților rezervoarelor la care $l/s < 2.5$, trebuie să considerăm influența reciprocă a condițiilor marginilor opuse.

6.4.1.2. PEREȚI CU GROSIME VARIABILĂ

În cazul peretelui a cărui grosime variază după legea liniară:

$$(6.124) \quad h_x = \alpha \cdot x,$$

ecuația (6.109), fără partea dreaptă, capătă aspectul:

$$(6.125) \quad \frac{d^2}{dx^2} \left(x^3 \frac{d^2 w}{dx^2} \right) + \frac{12}{\alpha^2 \cdot R_0^2} \cdot x \cdot w = 0$$

Cap. 6. Elemente privind calculul rezervoarelor cilindrice

Această ecuație cu aspect complex poate fi adusă la o formă similară ecuației Bessel.

Rezolvarea poate fi simplificată dacă mărimea variației grosimii peretelui se aproximează prin:

$$(6.126) \quad h_x = h_B (1 + \beta x)^2;$$

această expresie este satisfăcătoare pentru practică. În acest caz, rigiditatea plăcii la încovoiere devine:

$$(6.127) \quad D_x = \frac{E \cdot h_B^3 (1 + \beta x)^6}{12}.$$

Înlocuind D_x în ecuația omogenă corespunzătoare ecuației (6.109), după simplificarea cu $(1 + \beta x)^2$, se obține ⁴⁾:

$$(6.128) \quad \begin{aligned} (1 + \beta x)^4 \frac{d^4 w}{dx^4} + 12\beta(1 + \beta x)^3 \frac{d^3 w}{dx^3} + \\ + 30\beta^2(1 + \beta x)^2 \frac{d^2 w}{dx^2} + \frac{12}{h_B^2 R_0^2} w = 0 \end{aligned}$$

Această ecuație, numită ecuația Euler, prin substituția

$$(6.129) \quad (1 + \beta x) = e^t \text{ sau } t = \ln(1 + \beta x)$$

devine o ecuație cu coeficienți constanți, cu soluția de forma:

$$(6.130) \quad w = c_1 \cdot e^{r_1 t} + c_2 \cdot e^{r_2 t} + c_3 \cdot e^{r_3 t} + c_4 \cdot e^{r_4 t}$$

în care $c_1, \dots, c_4$ sunt coeficienții de integrare, iar $r_1, \dots, r_4$ - rădăcinile ecuației caracteristice.

Considerând $w = (1 + \beta x)^r$ în (6.128) se obține:

$$(6.131) \quad r^4 + 6r^3 + 5r^2 - 12r + \frac{12}{h_B^2 R_0^2 \beta^4} = 0$$

$$\text{Pentru } r = z - \frac{6}{4}, \quad (6.132)$$

se obține:

$$(6.133) \quad z^4 - 8,5z^2 + \frac{225}{16} + \delta = 0 \quad \text{în care}$$

$$(6.134) \quad \delta = \frac{12}{h_B^2 R_0^2 \cdot \beta^4}$$

Rădăcinile ecuației (6.133) sunt:

$$(6.135) \quad \begin{aligned} z_{1...4} &= \pm \sqrt{4,25 \pm \sqrt{4,25^2 - \frac{225}{16} - \delta}} \\ &= \pm \sqrt{4,25 \pm \sqrt{4 - \delta}} \end{aligned}$$

Considerând (6.132), rădăcinile ecuației caracteristice (6.131) devin:

$$(6.136) \quad r_{1...4} = \pm \sqrt{4,25 \pm \sqrt{4 - \delta}} - \frac{6}{4}$$

Pentru $\delta < 4$, toate rădăcinile (6.136) sunt reale. Considerând substituția (6.129), soluția (6.130) capătă aspectul:

$$(6.137) \quad w = c_1(1 + \beta x)^{r_1} + c_2(1 + \beta x)^{r_2} + c_3(1 + \beta x)^{r_3} + c_4(1 + \beta x)^{r_4}$$

în care:

$$(6.138) \quad \begin{cases} r_{1,2} = -\sqrt{4,25 \pm \sqrt{4 - \delta}} - \frac{6}{4}; \\ r_{3,4} = +\sqrt{4,25 \pm \sqrt{4 - \delta}} - \frac{6}{4}. \end{cases}$$

Rădăcinile $r_{1,2}$ corespund funcției de amortizare pe măsura îndepărtării de marginea superioară a plăcii curbe, iar rădăcinile $r_{3,4}$ corespund funcțiilor de amortizare pe măsura îndepărtării de marginea inferioară a plăcii curbe.

Pentru $\delta = 4$, toate rădăcinile (6.136) sunt reale și duble ⁵⁾. În acest caz soluția devine:

$$(6.139) \quad \begin{aligned} w &= c_1(1 + \beta x)^{r_1} + c_2(1 + \beta x)^{r_1} \cdot \ln(1 + \beta x) + c_3(1 + \beta x)^{r_2} + \\ &+ c_4(1 + \beta x)^{r_2} \cdot \ln(1 + \beta x) \end{aligned}$$

$$\text{în care:} \quad r_1 = -\sqrt{4,25} - 1,5 = -3,562;$$

$$r_2 = +\sqrt{4,25} - 1,5 = -0,562.$$

Pentru $\delta > 4$ rădăcinile (6.136) sunt complexe:

$$(6.140) \quad r_{1...4} = \pm \sqrt{4,25 \pm i\sqrt{\delta - 4}} - \frac{6}{4} = \pm(p \pm i \cdot q)$$

în care:

$$(6.141) \quad \begin{cases} p = \sqrt{\frac{1}{2}(\sqrt{14,0625 + \delta} + 4,25)} - \frac{6}{4}; \\ q = \sqrt{\frac{1}{2}(\sqrt{14,0625 + \delta} - 4,25)}. \end{cases}$$

Soluția (6.130) poate fi scrisă sub forma:

$$(6.142) \quad w = c_1 \cdot \eta_1(t) + c_2 \cdot \eta_2(t) + c_3 \cdot \eta_3(t) + c_4 \cdot \eta_4(t)$$

în care:

$$(6.143) \quad \begin{cases} \eta_1(t) = e^{-pt} \cdot \cos qt; \\ \eta_2(t) = e^{-pt} \cdot \sin qt; \\ \eta_3(t) = e^{pt} \cdot \cos qt; \\ \eta_4(t) = e^{pt} \cdot \sin qt. \end{cases}$$

Considerând (6.129), **soluția finală a ecuației** (6.128) poate fi scrisă în funcție de variabila x :

(6.144)

$$w = (1 + \beta x)^{-p} \{c_1 \cdot \cos[q \cdot \ln(1 + \beta x)] + c_2 \cdot \sin[q \cdot \ln(1 + \beta x)]\} + (1 + \beta x)^p \{c_3 \cdot \cos[q \cdot \ln(1 + \beta x)] + c_4 \cdot \sin[q \cdot \ln(1 + \beta x)]\}$$

Ca și în cazul pereților cilindrici cu grosime constantă, soluția (6.144) descrie alternanța funcțiilor de amortizare pe măsura îndepărtării de marginile plăcii cilindrice.

Soluțiile cazurilor doi și trei tind către cele corespunzătoare plăcii curbe cu grosime cu variație puternică, iar în primul caz - pentru pereții cu grosime ușor variabilă, apropiată de cea liniară.

Pentru pereții cilindrici cu variația liniară a grosimii, în vederea determinării eforturilor secționale interioare și a deplasării, sub încărcări axial simetrice, se pot folosi relațiile ⁶⁾:

$$(6.175) \quad \begin{cases} w = c_1(1 + \beta x)^{r_1} + c_2(1 + \beta x)^{r_2} + c_3(1 + \beta x)^{r_3} + c_4(1 + \beta x)^{r_4}; \\ T_2 = -\frac{E \cdot h_x}{R_0} \cdot w; \end{cases}$$

$$(6.145) \quad \begin{cases} g = \frac{dw}{dx} = \beta [c_1 \cdot r_1 (1 + \beta x)^{r_1-1} + c_2 \cdot r_2 (1 + \beta x)^{r_2-1} + \\ + c_3 \cdot r_3 (1 + \beta x)^{r_3-1} + c_4 \cdot r_4 (1 + \beta x)^{r_4-1}]; \\ M_1 = -\frac{E h_x^3}{12} \cdot \beta^2 \cdot [c_1 \cdot r_1 (r_1 - 1) (1 + \beta x)^{r_1-2} + \\ + c_2 \cdot r_2 (r_2 - 1) (1 + \beta x)^{r_2-2} + c_3 \cdot r_3 (r_3 - 1) (1 + \beta x)^{r_3-2} + \\ + c_4 \cdot r_4 (r_4 - 1) (1 + \beta x)^{r_4-2}]; \\ Q = -\frac{E h_x^3}{12} \cdot \beta^3 [c_1 \cdot r_1 (r_1 - 1) (r_1 + 4) (1 + \beta x)^{r_1-3} + \\ + c_2 \cdot r_2 (r_2 - 1) (r_2 + 4) (1 + \beta x)^{r_2-3} + \\ + c_3 \cdot r_3 (r_3 - 1) (r_3 + 4) (1 + \beta x)^{r_3-3} + \\ + c_4 \cdot r_4 (r_4 - 1) (r_4 + 4) (1 + \beta x)^{r_4-3}]. \end{cases}$$

În expresiile (6.145), coeficienții $c_1, \dots, c_4$ reprezintă coeficienți de integrare; aceștia se determină din condiții de margine, ca în cazul pereților cilindrici cu grosime constantă.

6.4.2. DETERMINAREA PRESIUNII PRODUSE DE INELELE DE ARMĂTURĂ PRETENSIONATĂ PE PLACA CILINDRICĂ

Armăturile pretensionate folosite la precomprimarea pereților rezervoarelor pot fi tensionate pe două căi:

1) **mecanic**, în care armătura din OIR este continuă și se tensionează prin înfășurarea construcției cilindrice cu ajutorul unei mașini speciale;

2) **manual** și **mecanic**, prin dispunerea fasciculelor segmentate în canale, sub formă de inele și tensionarea acestora cu ajutorul preselor hidraulice și dinamometrelor; în unele cazuri apare ca rațională tensionarea **electrotermică** a armăturilor din OIR sub formă de bare groase, grupate în inele, încălzite, dilatate și blocate la temperaturi de 340 ... 400° C.

Distanța între inelele de armătură, pe înălțimea rezervorului, poate fi constantă (cazul precomprimării prin înfășurare) sau variabilă (cazul precomprimării rezervorului cu inele din fascicule segmentate).

În continuare, se va stabili **mărimea distanței dintre inelele de armătură pretensionată** și influența acesteia asupra deformabilității pânzei cilindrice.

Se consideră cazul precomprimării prin înfășurare (distanță constantă între armăturile pretensionate).

Distanța dintre inele/sârme trebuie să satisfacă condiția:

$$(6.146) \quad p = \frac{T}{s}$$

în care T este presiunea inelară concentrată, exercitată de armătura pretensionată pe placa curbă;
 s - pasul sârmei/inelului.

$$(6.147) \quad T = \frac{N}{R} \cong \frac{N}{R_0}$$

în care N - forța de pretensionare din armătură;
 R - raza corespunzătoare suprafeței exterioare a peretelui cilindric; în cazul fasciculelor segmentate, plasate în canale, se consideră R_0 - raza corespunzătoare suprafeței mediane a peretelui cilindric (fig. 6.20).

Se admite că armăturile sub formă de spire din sârmă de înaltă rezistență nu se disting pe suprafața exterioară a peretelui și că pe conturul armăturii nu se produc striviri ale inelului de beton al peretelui.

Considerând (6.146) și (6.147), se poate scrie:

$$(6.148) \quad p = \frac{N}{R_0 \cdot s}$$

Se poate considera că variația elementară a intensității presiunii dp este proporțională cu deplasarea elementară a suprafeței mediane a plăcii curbe dw , adică:

$$(6.149) \quad - dp = \alpha dw$$

în care α este un coeficient de proporționalitate.

Semnul "minus" din (6.149) arată că odată cu creșterea valorii w intensitatea p se diminuează.

Semnificația fizică a coeficientului α constă în următoarele: din cauza presiunii elementare după raza plăcii curbe, suprafața sa mediană se reduce, astfel că scurtarea specifică a inelului de armătură va fi:

$$(6.150) \quad \varepsilon_a = \frac{2\pi R_a - 2\pi(R_a - dw)}{2\pi R_a} = \frac{dw}{R_a}$$

Cap. 6. Elemente privind calculul rezervoarelor cilindrice

în care R_a este raza inelului de armătură (distanța de la axa de simetrie a peretelui/plăcii până la centrul de greutate al secțiunii inelului de armătură).

Considerând relația (6.150) și legea lui Hooke, **scăderea forței de întindere N** , în armătura pretensionată, va fi:

$$(6.151) \quad dN = E_a \cdot A_a \cdot \frac{dw}{R_a}$$

Pe de altă parte, considerând (6.148) și (6.151), se poate scrie:

$$(6.152) \quad -dp = \frac{dN}{R_0 \cdot s} = \frac{E_a \cdot A_a}{R_0 \cdot R_a \cdot s} dw$$

Comparând (6.152) cu (6.149) se observă că:

$$(6.153) \quad \alpha = \frac{E_a \cdot A_a}{R_0 \cdot R_a \cdot s}$$

După cum se observă din (6.153), pentru $s = s(x)$ sau $A_a = A_a(x)$, mărimea α va fi, de asemenea, variabilă.

În practică, pentru **armarea tuburilor** se consideră $\alpha = \text{constant}$, iar pentru armarea pereților rezervoarelor se admite legea de variație liniară:

$$(6.154) \quad \alpha = \alpha_k + \frac{\varphi}{\lambda} (\alpha_H - \alpha_k)$$

în care:

$\lambda = l/S$ - lungimea relativă a inelului desfășurat al plăcii curbe;

l - lungimea absolută a inelului desfășurat al plăcii curbe;

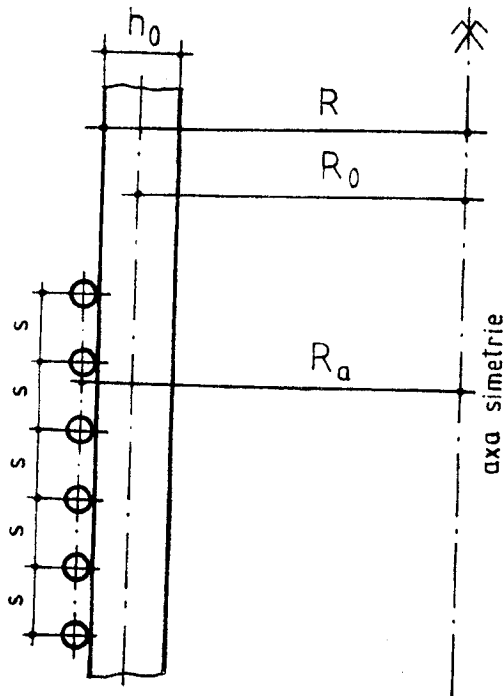


Fig. 6.20.
Schema de dispunere a
armăturii pretensionate
inelare (continuă) pe
peretele cilindric.

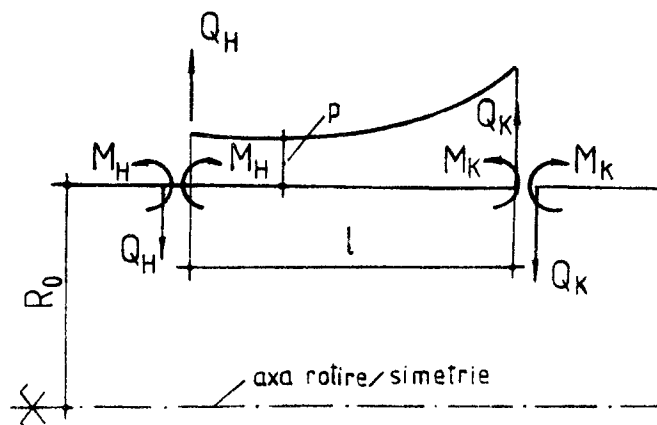


Fig. 6.21.A. Schemă pentru determinarea eforturilor
interioare zonale în placa cilindrică de lungime
finită "l", extrasă dintr-o placă cu lungime infinită.

α_H, α_k - mărimile α corespunzătoare originii/începutului și sfârșitului înfășurării;

φ - coordonata relativă curentă.

6.4.2.1. PRESIUNEA ÎNFĂȘURĂRII ASUPRA PLĂCII CURBE DE LUNGIME INFINITĂ

Se consideră că începutul și sfârșitul zonei înfășurate a pânzei cilindrice se află pe o lungime cunoscută pe fața pânzei cilindrice (fig. 6.21). În acest caz, săgeata într-un punct oarecare A, produsă prin încărcarea elementară inelară pdx , acționând la distanța x de punctul A, se determină cu relația:

$$(6.155) \quad dw = \frac{pdxS^3}{8D}(\eta_1 + \eta_2),$$

în care:

$$(6.156) \quad S = 0,76\sqrt{h \cdot R_0}; \quad \varphi = \frac{x}{S};$$

$$\eta_1 = e^{-\varphi} \cos \varphi; \quad \eta_2 = e^{-\varphi} \sin \varphi.$$

$D = EI$ - rigiditatea la încovoiere a plăcii cilindrice.

Înlocuind (6.155) în (6.149) se obține:

$$(6.157) \quad dp = -\frac{\alpha pdxS^3}{8D}(\eta_1 + \eta_2) = -\frac{\alpha pS^4}{8D}(\eta_1 + \eta_2)d\varphi.$$

Semnificația fizică a relației (6.157) constă în faptul că încărcarea elementară pdx provoacă **schimbarea presiunii** cu

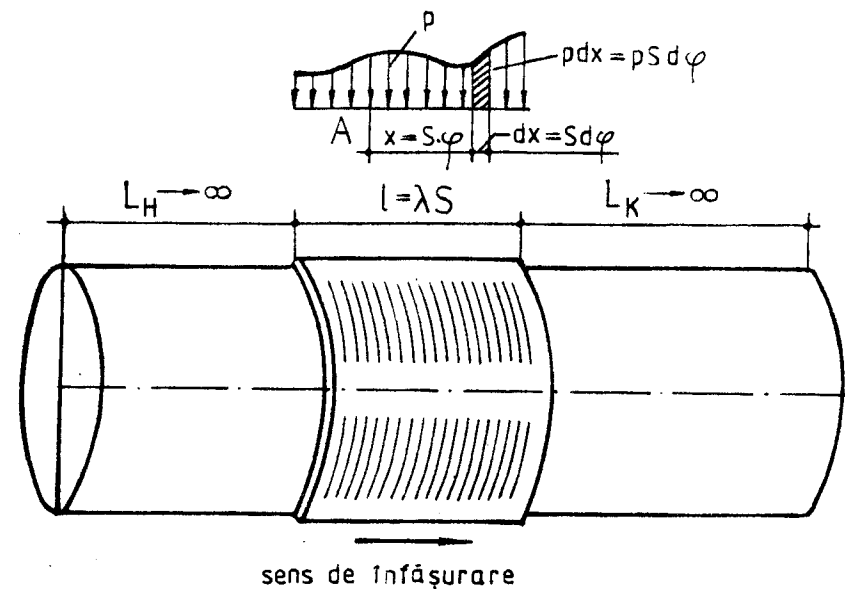


Fig. 6.21. Schema de înfășurare a armăturii pretensionate inelare (de exemplu, la tuburi prefabricate din BP) pe plăci cilindrice cu lungime infinită.

Cap. 6. Elemente privind calculul rezervoarelor cilindrice

cantitatea dp numai în punctele care se află pe o distanță oarecare de zona pe care acționează încărcarea elementară pdx .

În punctul în care acționează pdx , mărimea presiunii p , ca urmare a deplasării w , nu se modifică.

Înlocuind pe α din (6.154) în (6.157) se obține ⁷⁾:

$$(6.158) \quad \frac{dp}{p} = -(\beta_k + \beta \cdot \varphi)(\eta_1 + \eta_2) d\varphi$$

$$\text{în care:} \quad \beta_k = \frac{\alpha_k \cdot S^4}{8D}, \quad \beta = \frac{(\alpha_H - \alpha_k) S^4}{8\lambda D}.$$

Integrând (6.158) se determină:

$$(6.159) \quad p = c \cdot e^{\beta_k \cdot \eta_1 + \frac{1}{2} \beta [(2\varphi+1)\eta_1 - \eta_2]}$$

în care c este un coeficient de integrare.

Luând pentru început în considerare faptul că deplasarea φ este independentă, în secțiunea în care se află ultima înfășurare, ținând seama de împrejurarea că în această secțiune presiunea p este cunoscută, adică $p(\varphi = 0) = p_k$, din (6.159) se deduce că:

$$(6.160) \quad c = p_k \cdot e^{-1/2 \beta - \beta_k}$$

Înlocuind (6.160) în (6.159), în final, se determină relația:

$$(6.161) \quad p = p_k \cdot e^{-\beta_k(1-\eta_1) - \frac{1}{2} \beta [1 - (2\varphi+1)\eta_1 + \eta_2]}$$

Pentru $\beta = 0$, adică pentru $\alpha_H = \alpha_k$ (pentru înfășurare cu spire având pas constant sau cu arii constante de armătură, dispusă pe

Cap. 6. Elemente privind calculul rezervoarelor cilindrice

lungimea unitară a paramentului plăcii curbe), împreună cu (6.161) se poate obține o expresie mai simplă:

$$(6.162) \quad p = p_k \cdot e^{-\beta_k(1-\eta_1)}$$

În acest fel, pentru plăcile cilindrice cu lungime infinită, la care înfășurarea se realizează la o distanță suficient de mare de zonele extreme (capete) cu armătură pretensionată, presiunea acesteia pe placa curbă se determină cu relația (6.161) sau, pentru $\alpha = \text{constant}$ cu relația (6.162).

Din cele prezentate rezultă că pe măsură ce ne îndepărtăm de ultima spiră a înfășurării, presiunea p se reduce ⁸⁾ față de mărimea constantă, după legea:

$$(6.163) \quad p = p_k \cdot e^{-\frac{1}{2} \beta - \beta_k}$$

sau pentru pași constanți ai înfășurării cu armătură pretensionată,

$$(6.163.a) \quad p = p_k \cdot e^{-\beta_k}$$

Cunoscând presiunea p se pot determina mărimile eforturilor secționale și a deformațiilor în orice punct al pânzei cilindrice.

6.4.2.2. PRESIUNEA ARMĂTURII PRETENSIONATE ÎNFĂȘURATE PE PÂNZELE CILINDRICE CU LUNGIME FINITĂ

Pentru stabilirea presiunii înfășurării peretelui cilindric cu lungime finită trebuie să se determine mărimile momentelor și forțelor tăietoare în secțiunile care corespund începutului și sfârșitului înfășurării pe peretele cilindric cu lungime infinită, considerând în

această etapă că presiunea p este stabilă iar pânza cu armătura înfășurată sub efort reprezintă un sistem elastic unic.

Cu aceasta deplasarea plăcii cilindrice w sub o încărcare oarecare va provoca variația efortului unitar în armătură, în consecință și presiunea acesteia pe placa cilindrică.

Chiar încărcările ce acționează și determină deplasarea, nu vor depinde de presiunea înfășurării asupra peretelui (dacă se neglijează mărirea grosimii peretelui datorită existenței înfășurării și dispunerii torcretului, care se realizează simultan).

Pentru a găsi M și Q în secțiunile menționate se poate scrie (fig. 6.22):

$$(6.164) \quad \begin{cases} a_{11} \cdot M + a_{12} Q + \Delta_{1p} = 0 \\ a_{21} \cdot M + a_{22} Q + \Delta_{2p} = 0 \end{cases}$$

unde pentru secțiunile intermediare ale pânzelor cilindrice cu lungime infinită $a_{11} = 2S$; $a_{12} = a_{21} = 0$; $a_{22} = S^3$; $S = 0,76\sqrt{hR_0}$; Δ_{1p} , Δ_{2p} - termeni de încărcare.

Pentru $a_{12} = a_{21} = 0$, sistemul (6.164) se reduce la două ecuații independente din care se obțin:

$$(6.165) \quad \begin{cases} M = -\frac{\Delta_{1p}}{a_{11}}; \\ Q = -\frac{\Delta_{2p}}{a_{22}}. \end{cases}$$

În zona secțiunilor ce corespund începutului înfășurării, presiunea p reprezintă o mărime constantă, după cum se observă din (6.163).

Prin urmare:

$$\Delta_{1p_H} = 0; \quad \Delta_{2p_H} = -\frac{1}{4} p_k \cdot S^4 \cdot e^{-\frac{1}{2}\beta - \beta_k}$$

(în cazul înfășurării cu pas constant, $\Delta_{2p_H} = -\frac{1}{4} p_k \cdot S^4 \cdot e^{-\beta_k}$).

De aici,

$$(6.166) \quad \begin{cases} M_H = 0; \\ Q_H = \frac{1}{4} p_k \cdot S \cdot e^{-\frac{1}{2}\beta - \beta_k}; \\ \text{(sau } Q_H = \frac{1}{4} \cdot p_k \cdot S \cdot e^{-\beta_k}). \end{cases}$$

Indicele "H" indică începutul înfășurării. În secțiunea ce corespunde sfârșitului înfășurării,

$$(6.167) \quad \Delta_{2p_k} = -\frac{1}{4} p_k \cdot S^4$$

În ceea ce privește termenul Δ_{1p} , D - multiplul unghiului de rotire a secțiunii, corespunzătoare sfârșitului înfășurării, mărirea acestuia poate fi determinată pe calea diferențierii lui $w_p = \frac{p \cdot R_0^2}{E \cdot h}$.

Ținând seama de faptul că $\frac{dw}{dx} = \frac{1}{S} \frac{dw}{d\varphi}$ se obține:

$$\frac{dw_p}{dx} = -\frac{p_k R_0^2}{E h S} (\beta\varphi + \beta_k)(\eta_1 + \eta_2) \cdot e^{-\beta_k(1-\eta_1) - \frac{1}{2}\beta[1-(2\varphi+1)+\eta_2]};$$

D – multiplul valorii $\frac{dw_p}{dx}$, pentru $\varphi = 0$, este Δp_k :

$$(6.168) \quad \Delta p_k = -\frac{p_k \cdot S^3}{4} \cdot \beta_k$$

De aici, din relația (6.165), considerând (6.167) și (6.168) se determină:

$$(6.169) \quad \begin{cases} M_k = \frac{1}{8} p_k \cdot S^2 \cdot \beta_k; \\ Q_k = \frac{1}{4} p_k \cdot S_k. \end{cases}$$

Indicele "k" indică sfârșitul înfășurării.

Pentru a obține presiunea exercitată de armătura pretensionată asupra peretelui cilindric de **lungime finită**, egală cu lungimea înfășurării, este necesar ca în secțiunile pânzei (cu lungime infinită), corespunzătoare începutului și sfârșitului înfășurării, să se aplice momentele și forțele tăietoare egale cu M_H , M_k , Q_H și Q_k , obținute mai sus, însă inverse ca semn, respectiv să se determine cu aceste forțe și momente **deplasările suplimentare** Δw în zona peretelui cu înfășurare, considerând că M_H , ..., Q_k nu depind de Δw .

Cunoscându-se Δw se poate determina **reducerea suplimentară a presiunii armăturii pretensionate pe peretele cilindric** după relația $\Delta p = \alpha \Delta w$.

Însumând algebric Δp cu p din (6.161) sau (6.162), se obține **presiunea finală p** pe peretele cilindric cu lungime finită, respectiv starea de eforturi și deformații în pânză, produsă de presiunea înfășurătorii cu armătură pretensionată.

Prin aceasta, în zona de începere a înfășurării, p , Δp , w , Δw se sumează algebric în toate punctele zonei marginale ale plăcii curbe.

6.4.2.2.1. EXEMPLE DE CALCUL

Exemplul 1

Se consideră grosimea peretelui cilindric $h = 10$ cm, înălțimea sa $l = 600$ cm, raza suprafeței mediane $R_0 = 500$ cm, respectiv calitățile materialelor asociate în betonul armat prin $E_a = 2,1 \cdot 10^6$ daN/cm² și $E_b = 2,8 \cdot 10^5$ daN/cm²; procentul de armare pentru armătura pretensionată este egal cu 2,5 și conduce la $Aa/s = 0,25$ cm (pe toată lungimea peretelui).

Se cere **să se determine presiunea armăturii pretensionate pe placa cilindrică**.

Se determină următoarele mărimi:

$$S = 0,76 \sqrt{h R_0} = 0,76 \sqrt{10 \cdot 500} = 53,74$$

$$\alpha_k = \alpha_H = \frac{E_a A_a}{R_0 R_{as}} \cong \frac{E_a}{R_0^2} \cdot 0,25 = \frac{2,1 \cdot 10^6}{500^2} \cdot 0,25 = 2,1 \text{ daN/cm}^4$$

$$D = \frac{E_b \cdot h^3}{12} = \frac{2,8 \cdot 10^5 \cdot 10^3}{12} = 2,33 \cdot 10^7 \text{ daN} \cdot \text{cm}$$

$$\beta_k = \frac{\alpha_k \cdot S^4}{8D} = \frac{2,1 \cdot 53,74^4}{8 \cdot 2,33 \cdot 10^7} = 0,0939645$$

$$\lambda = \frac{l}{S} = \frac{600}{53,74} = 11,1648$$

Presiunea p produsă de armătura pretensionată prin înfășurare pe un cilindru cu lungime infinită, cu pas constant de înfășurare, se determină cu relația (6.162).

Mărimile necesare pentru calcul sunt date în tabelul 6.4.2.2.a.

Valorile coordonatelor relative curente φ variază de la secțiunea ce corespunde sfârșitului înfășurării.

Tab. 6.4.2.2.a

x, cm	$\varphi = \frac{x}{S}$	η_1	$1-\eta_1$	$\beta_k(1-\eta_1)$	$p = p_k \cdot e^{-\beta_k(1-\eta_1)}$
0	0	1,000000	0	0	p_k
42,5	0,7908	0,453460	0,546540	0,05135	0,9499 p_k
85	1,5817	0,205536	0,794464	0,07465	0,9281 p_k
300	5,5820	0,003745	0,996255	0,09361	0,9106 p_k
515	9,5832	0,000068	0,999932	0,09396	0,9103 p_k
600	11,1648	0,000014	0,999986	0,09396	0,9103 p_k

Forțele tăietoare și momentele încovoietoare în secțiunile ce corespund începutului și sfârșitului înfășurării, pe peretele cilindric cu lungime infinită, devin:

$$Q_H = \frac{1}{4} p_k \cdot S \cdot e^{-\beta_k} = \frac{1}{4} \cdot p_k \cdot 53,74 \cdot e^{-0,0939645} = 12,23 p_k;$$

$$M_H = 0;$$

$$Q_k = \frac{1}{4} p_k \cdot S = \frac{1}{4} \cdot 53,74 \cdot p_k = 13,435 p_k;$$

$$M_k = \frac{1}{8} \cdot p_k \cdot S^2 \cdot \beta_k = \frac{1}{8} \cdot 53,74^2 \cdot 0,0939645 p_k = 33,921 p_k.$$

Reducerea presiunii asupra pânzei cilindrice cu lungime finită (600 cm) în secțiunea corespunzătoare începutului înfășurării se determină cu relația:

$$\begin{aligned} \Delta p_H &= \alpha \cdot \frac{Q_H \cdot S^3}{2D} \eta_1 = \frac{\alpha p_k \cdot S^4 \cdot e^{-\beta_k}}{8D} \eta_1 = \\ &= \beta_k \cdot p_k \cdot e^{-\beta_k} \cdot \eta_1 = 0,0939645 \cdot 0,9103 p_k \cdot \eta_1 = \\ &= 0,0855 p_k \cdot \eta_1 \end{aligned}$$

Calcululele se conduc tabelar.

Reducerea presiunii asupra pânzei cilindrice chiar în zona secțiunii corespunzătoare sfârșitului înfășurării se determină cu relațiile:

$$\Delta p_{Q_k} = \alpha \cdot \frac{Q_k \cdot S^3}{2D} \eta_1 = \frac{\alpha p_k \cdot S^4}{8D} \eta_1 = \beta_k \cdot p_k \cdot \eta_1 = 0,0939645 p_k \cdot \eta_1$$

$$\begin{aligned} \Delta p_{M_k} &= \alpha \cdot \frac{M_k \cdot S^2}{2D} (-\eta_1 + \eta_2) = \frac{\alpha \cdot p_k \cdot S^4 \cdot \beta_k}{16D} (-\eta_1 + \eta_2) = \\ &= \frac{1}{2} \beta_k \cdot p_k (-\eta_1 + \eta_2) = 0,04698 p_k (-\eta_1 + \eta_2). \end{aligned}$$

Detalii privind calculul valorilor corespunzătoare coordonatelor curente sunt date în tabelele 6.4.2.2.b (începutul înfășurării) și 6.4.2.2.c (sfârșitul înfășurării).

Tab. 6.4.2.2.b

x, cm	φ	η_1	Δp_H	$(p - \Delta p_H)$
0	0	1	0,0855 p_k	$(0,9103 - 0,0855) p_k = 0,8248 p_k$
28,128	0,5234	0,59247	0,05065 p_k	$(0,9103 - 0,05065) p_k = 0,85965 p_k$
56,26	1,0468	0,35095	0,03001 p_k	$(0,9103 - 0,03001) p_k = 0,88029 p_k$
84,36	1,5698	0	0	0,9103 p_k

Exemplul 2

Se consideră dimensiunile și caracteristicile plăcii cilindrice din primul exemplu, însă cantitatea de armătură pretensionată este liniar variabilă pe lungimea (înălțimea) peretelui cilindric, astfel încât în secțiunea de început a înfășurării $\frac{A_a}{s_H} = 0,1 \text{ cm}$ ($\mu_H = 1 \%$), iar în

secțiunea de sfârșit a înfășurării $\frac{A_a}{s_k} = 0,5 \text{ cm}$ ($\mu_k = 5 \%$).

Se cere să se determine presiunea armăturii pretensionate pe peretele cilindric.

Caracteristicile S și D se mențin ca în exemplul precedent:

$$S = 53,74; \quad D = 2,33 \cdot 10^7; \quad \lambda = 11,1648.$$

Suplimentar, se obțin:

$$\alpha_H = \frac{E_a A_a}{R_0 \cdot R_a \cdot s_H} \approx \frac{E_a}{R_0^2} \cdot 0,1 = \frac{2,1 \cdot 10^6}{500^2} \cdot 0,1 = 0,84 \text{ daN/cm}^3$$

$$\alpha_k = \frac{E_a A_a}{R_0 R_a s_k} \approx \frac{E_a}{R_0^2} \cdot 0,5 = \frac{2,1 \cdot 10^7}{500^2} \cdot 0,5 = 4,2 \text{ daN/cm}^3$$

$$\beta = \frac{(\alpha_H - \alpha_k) S^4}{8 \lambda D} = -\frac{3,36 \cdot 53,74^4}{8 \cdot 11,1648 \cdot 2,33 \cdot 10^7} = -0,013466$$

$$\beta_k = \frac{\alpha_k \cdot S^4}{8 D} = \frac{4,2 \cdot 53,74^4}{8 \cdot 2,33 \cdot 10^7} = 0,18793$$

Presiunea p pe placa cilindrică cu lungime infinită sub acțiunea armăturii se determină cu relația (6.161).

Pentru aceasta, ca și în exemplul precedent, se determină coordonatele curente ce conduc la secțiunea corespunzătoare sfârșitului înfășurării; calculele necesare sunt detaliate în tabelul 6.4.2.2.b.

După cum se observă din aplicațiile numerice, odată cu creșterea cantității de armătură pretensionată spre sfârșitul înfășurării, sau, dacă forța în ultimile inele ale înfășurării este mai mare, ca în cazul precedent, reducerea presiunii inițiale asupra pânzei cilindrice este mai mare în comparație cu cazul cantității constante de armătură, înfășurată pe toată înălțimea plăcii cilindrice.

Se va analiza acum cazul pânzei cilindrice cu lungimea menționată. Se vor determina forțele tăietoare și momentele încovoietoare în secțiunile ce corespund începutului și sfârșitului înfășurării plăcilor cilindrice cu lungime infinită:

$$Q_H = \frac{1}{4} \cdot 0,828 \cdot p_k \cdot S = \frac{1}{4} \cdot 0,828 \cdot 53,74 \cdot p_k = 11,124 \cdot p_k;$$

$$M = 0;$$

$$Q_k = \frac{1}{4} \cdot p_k \cdot S = \frac{1}{4} \cdot 53,74 \cdot p_k = 13,435 \cdot p_k;$$

$$M_k = \frac{1}{8} p_k \cdot S^2 \cdot \beta_k = \frac{1}{8} \cdot 53,74^2 \cdot 0,18793 \cdot p_k = 67,842 \cdot p_k.$$

Reducerea presiunii pe placa cilindrică cu lungimea dată ($l = 600 \text{ cm}$) în zona în care începe înfășurarea se determină cu relația:

$$\Delta p_H = \alpha \cdot \frac{Q_k \cdot S^2}{2D} \eta_1 = \left[\alpha_H + \frac{\varphi}{\lambda} (\alpha_k - \alpha_H) \right] \frac{Q_H \cdot S^3}{2D} \eta_1 =$$

Cap. 6. Elemente privind calculul rezervoarelor cilindrice

$$= \left[0,84 + \frac{\varphi}{11,1648} (4,2 - 0,84) \right] \frac{11,124 \cdot 53,74^3}{2 \cdot 2,33 \cdot 10^7} p_k \cdot \eta_1 =$$

$$= (0,84 - 0,3\varphi) 0,037048 p_k \cdot \eta_1.$$

Reducerea presiunii pe pânza cilindrică cu lungimea dată în zona sfârșitului înfășurării va fi determinată de două mărimi:

$$\Delta p_{Q_k} = \alpha \frac{Q_k S^3}{2D} \eta_1 = \left[\alpha_k + \frac{\varphi}{\lambda} (\alpha_k - \alpha_H) \right] \frac{Q_k \cdot S^3}{2D} \eta_1 =$$

$$= (4,2 - 0,3\varphi) \frac{13,435 \cdot 53,74^3}{2 \cdot 2,33 \cdot 10^7} p_k \eta_1 = (4,2 - 0,3\varphi) 0,04474 p_k \cdot \eta_1;$$

$$\Delta p_{M_k} = \frac{M_k \cdot S^2}{2D} (-\eta_1 + \eta_2) =$$

$$= \left[\alpha_k + \frac{\varphi}{\lambda} (\alpha_H - \alpha_k) \right] \frac{M_k \cdot S^2}{2D} (-\eta_1 + \eta_2) =$$

$$= (4,2 - 0,3\varphi) \frac{67,842 \cdot 53,74^2}{2 \cdot 2,33 \cdot 10^7} (-\eta_1 + \eta_2) =$$

$$= (4,2 - 0,3\varphi) 0,00420 p_k (-\eta_1 + \eta_2)$$

Calcululele sunt sintetizate în tabelele 6.4.2.2.e și 6.4.2.2.f.

Tab. 6.4.2.2.e

x, cm	φ	α	η_1	Δp_H	$(p - \Delta p_H)$
0	0	4,200	1	0,08550 p_k	$(0,828 - 0,0855) p_k = 0,7425 p_k$
28,128	0,5234	4,350	0,59247	0,05065 p_k	$(0,828 - 0,05065) p_k = 0,7773 p_k$
56,260	1,0468	4,515	0,35095	0,03001 p_k	$(0,828 - 0,03001) p_k = 0,7979 p_k$
84,370	1,5698	4,672	0	0	0,828 p_k

Cap. 6. Elemente privind calculul rezervoarelor cilindrice

În condițiile date α reprezintă mărimea variabilă, de aceea în formulele pentru determinarea variației $\Delta \sigma_{pH}$, când se consideră că φ variază de la începutul înfășurării, α crește pe măsura creșterii valorii φ .

La evaluarea Δp și Δp_{M_k} , când se consideră că φ variază de la sfârșitul înfășurării, α se reduce pe măsura creșterii φ .

În tabelul 6.4.2.2.e sunt date rezultatele evaluărilor în zona începutului înfășurării, iar în tabelul 6.4.2.2.f pentru zona sfârșitului înfășurării.

Din aceste exemple rezultă că, pentru un **pas constant** al înfășurării, pierderile/reducerile maxime ale efortului inițial în armătură reprezintă 18 % și se produc pe o zonă redusă a plăcii cilindrice din apropierea începutului înfășurării.

În secțiunile intermediare ale plăcii cilindrice reducerea reprezintă 9 ... 10 %.

La înfășurarea cu **pas variabil**, mărimea reducerii depinde în mod esențial de ordinea înfășurării și distribuția cantității de armătură pe înălțimea pânzei cilindrice. Dacă cantitatea de armătură pretensionată se mărește în sensul înfășurării, atunci și reducerea efortului în armătură va fi maximă. Din cele două exemple rezultă că la începutul înfășurării reducerea reprezintă 26 %, iar în secțiunile intermediare - (18 ... 20) %.

Pierderile minime ale efortului de pretensionare vor fi înregistrate atunci când în secțiunea de început a înfășurării se dispune cantitatea maximă de armătură și pe măsura îndepărtării de începutul înfășurării. Consumul de armătură pe unitatea de lungime a plăcii cilindrice se reduce (după o lege liniară).

În concluzie, la rezervoarele la care legătura pereților cu radierul este concepută sub formă de îmbinări deplasabile este oportun ca înfășurarea să înceapă de la bază, dispunerea cantității maxime de armătură să se realizeze la partea inferioară, micșorând-o pe măsură ce ne apropiem cu înfășurarea spre zona superioară a peretelui cilindric.

Tab. 6.4.2.2.c

mm	φ	η_1	η_2	$\Delta p_{Q_k} =$ $= 0,09396 p_k \eta_1$	$\Delta p_{M_k} =$ $= 0,04698 p_k$	$(\Delta p_{Q_k} - \Delta p_{M_k})$	$p - (\Delta p_{Q_k} - \Delta p_{M_k})$
0	0	1	0	-	-	-	p_k
96	0,7852	0,4559	0,0056	0,04284 p_k	- 0,021150 p_k	0,063990 p_k	0,9360 p_k
991	1,5704	0	0,0051	-	0,000239 p_k	0,000239 p_k	0,9997 p_k
59	2,3550	0,0948	0,0035	0,00891 p_k	0,004280 p_k	0,004630 p_k	0,9995 p_k

Tab. 6.4.2.2.d

cm	φ	η_1	η_2	$\beta_k (1 - \eta_1)$	$1 + \eta_2$	$(2\varphi + 1) \eta_1$	p
0	0	1	0	0	1	1	p_k
42,1	0,7834	0,456800	0,00560	0,1021	1,00560	1,172510	0,903 p_k
85	1,5817	0,205500	0,00513	0,1493	1,00511	0,855578	0,861 p_k
300	5,5830	0,003740	0,00033	0,1872	1,00033	0,045501	0,839 p_k
515	9,5832	0,000068	0,00001	0,1879	1,00001	0,001371	0,828 p_k
600	-	-	-	-	-	-	0,828 p_k

Tab. 6.4.2.2.f

x, cm	φ	α	η_1	η_2	Δp_{Q_k}	Δp_{M_k}	$p - (\Delta p_{Q_k} - \Delta p_{M_k})$
0	0	4200	1	0	-	-	p_k
42,196	0,7852	3,9644	0,4559	0,00562	0,0810 p_k	0	$(0,903 - 0,081) p_k = 0,822 p_k$
84,391	1,5704	3,7229	0	0,00510	0	0,00008 p_k	$(0,861 - 0,00008) p_k = 0,860 p_k$
26,590	2,3350	3,4932	0,0948	0,00350	0,0148 p_k	- 0,00134 p_k	$(0,839 - 0,0148 + 0,00134) p_k =$ $= 0,826 p_k$

6.4.3. CALCULUL PEREȚILOR REZERVOARELOR CILINDRICE LA ÎNCĂRCĂRI NESIMETRICE

În afara încărcărilor principale axial simetrice asupra rezervoarelor pot acționa și încărcări nesimetrice.

La rezervoarele supraterane acestea sunt reprezentate de încărcările seismice orizontale, din vânt și alte acțiuni, iar la cele subterane - încărcările seismice, împingerea pământului pe o singură latură. Cele mai complicate pentru proiectarea rezervoarelor sunt calculele la încărcări orizontale de tip seismic.

La proiectarea rezervoarelor se utilizează prevederile din normativele naționale, respectiv cele specifice (rezervoare pentru petrol și produse petroliere).

În zone seismice se recomandă adoptarea rezervorului din beton armat de formă cilindrică.

La determinarea încărcărilor seismice, care intră în gruparea specială, se consideră următoarele cazuri de încărcare:

- pentru rezervoarele îngropate, goale, se consideră acțiunile inerțiale seismice ale terenului și greutateii proprii;

- pentru rezervoarele supraterane, umplute cu lichid, se consideră încărcările inerțiale seismice datorită greutateii lichidului și greutateii proprii.

Acțiunile inerțiale seismice ale petrolului și produselor petroliere pe pereții rezervoarelor pot fi determinate ca pentru un **lichid ideal** după relația

$$p(x) = \gamma \cdot x \cdot k_s \cdot k_1; \quad p(x, \theta) = p(x) \cos \theta,$$

în care:

$p(x)$ - este presiunea lichidului la distanța x de la radierul rezervorului, în N/m^2 ;

$p(x, \theta)$ - presiunea lichidului în punctul definit de coordonata unghiulară θ , în N/m^2 ;

γ - greutatea specifică a lichidului, N/m^3 ;

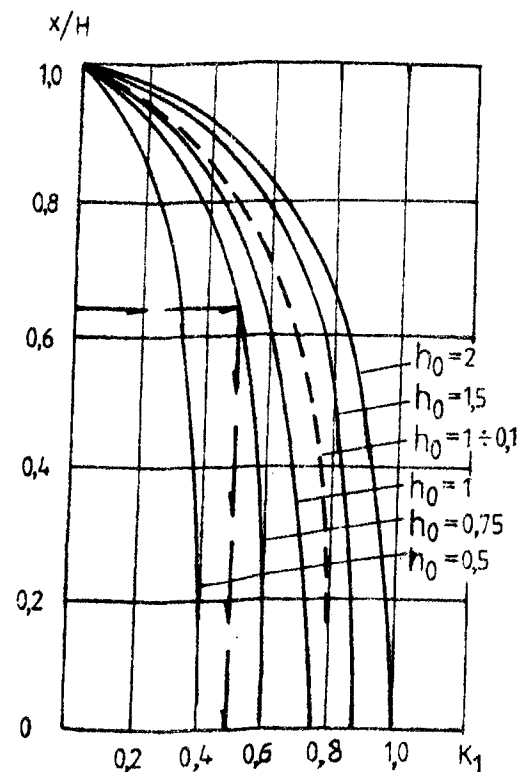


Fig. 6.22.

Grafic pentru determinarea coeficientului k_1 pentru rezervoare cilindrice (—) sau paralelipedice (- - -); $h_0 = H/R$ pentru rezervoare cilindrice; $h_0 = H/b$ pentru rezervoare paralelipedice; H, R - înălțimea și raza rezervorului cilindric; b - lungimea/lățimea rezervorului paralelipedic; x - mărimea ordonatei măsurată de la radierul rezervorului.

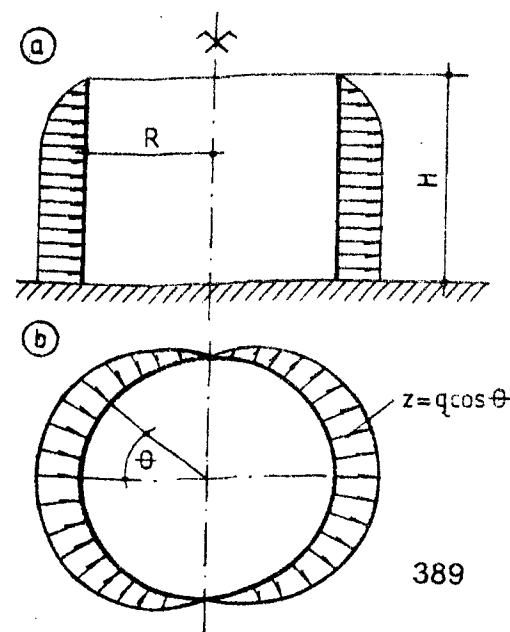


Fig. 6.23.

Diagrama împingerii seismice a lichidului pe pereții rezervorului: a - pe înălțimea peretelui; b - în plan orizontal.

Cap. 6. Elemente privind calculul rezervoarelor cilindrice

- k_s - coeficient seismic, conform normelor naționale;
 k_1 - coeficient ce poate fi determinat din fig. 6.22 în funcție de raportul x/H .

Diagrama împingerii seismice a lichidului pe peretele cilindric al rezervorului, conform normelor rusești (SN 326 – 65), este indicată în fig. 6.23.

În continuare se vor dezvolta ecuațiile de bază ale teoriei momentelor încovoietoare pentru plăcile cilindrice circulare.

Semnificația forțelor și momentelor și direcțiile lor de acțiune sunt date în fig. 6.24.

Ecuațiile de echilibru au forma:

$$(6.170) \quad \begin{cases} \frac{\partial T_1}{\partial \xi} - \frac{\partial S_2}{\partial \theta} + R_0 \cdot X = 0; \\ \frac{\partial S_1}{\partial \xi} + \frac{\partial T_2}{\partial \theta} - Q_2 + R_0 \cdot Y = 0; \\ T_2 - \frac{\partial Q_1}{\partial \xi} + \frac{\partial Q_2}{\partial \theta} + R_0 \cdot Z = 0; \\ \frac{\partial N_1}{\partial \xi} - \frac{\partial M_2}{\partial \theta} + R_0 \cdot Q_2 = 0; \\ \frac{\partial M_1}{\partial \xi} + \frac{\partial N_2}{\partial \theta} - R_0 \cdot Q_1 = 0; \\ S_1 + S_2 - \frac{N_2}{R_0} = 0. \end{cases}$$

în care:

$\xi = x/R_0$ - reprezintă poziția relativă a secțiunii orizontale pe înălțimea rezervorului, exprimată adimensional;

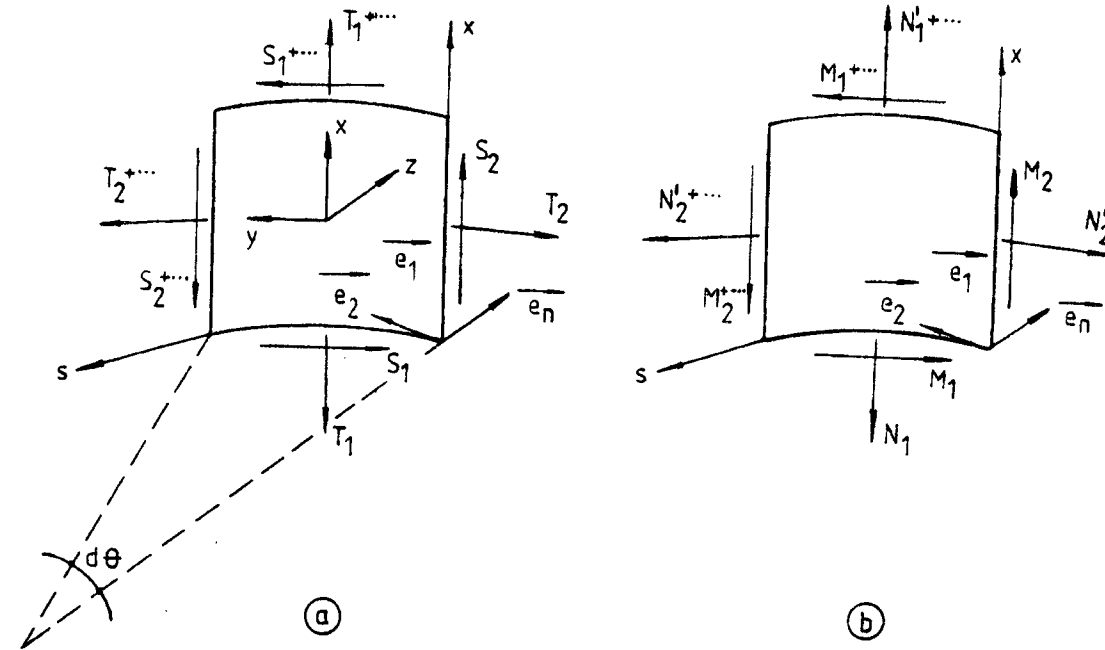


Fig. 6.24. Cu privire la ecuația de echilibru a plăcilor cilindrice: **a** – forțe ce acționează pe un element extras din placă; **b** – momente încovoietoare.

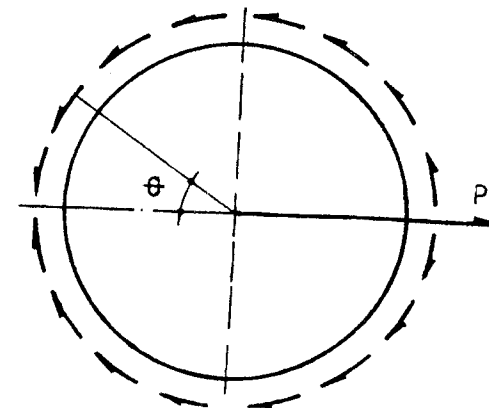


Fig. 6.25. Distribuția forțelor de alunecare la partea superioară a peretelui cilindric.

Cap. 6. Elemente privind calculul rezervoarelor cilindrice

θ - unghiul la centru ce precizează poziția generatoarei plăcii cilindrice;

X, Y, Z - componentele încărcării exterioare.

Relațiile care exprimă legătura dintre componentele deformației și deplasării au următorul aspect:

$$(6.171) \quad \begin{cases} \varepsilon_1 = \frac{1}{R_0} \cdot \frac{\partial u}{\partial \xi}; & \varepsilon_2 = \frac{1}{R_0} \left(\frac{\partial v}{\partial \theta} - w \right); \\ w = \frac{1}{R_0} \left(\frac{\partial v}{\partial \xi} + \frac{\partial u}{\partial \theta} \right); \\ \chi_1 = \frac{1}{R_0^2} \frac{\partial^2 w}{\partial \xi^2}; & \chi_2 = \frac{1}{R_0^2} \left(\frac{\partial^2 w}{\partial \theta^2} + \frac{\partial v}{\partial \theta} \right); \\ \tau = \frac{1}{R_0^2} \left(\frac{\partial^2 w}{\partial \xi \partial \theta} + \frac{\partial v}{\partial \xi} \right). \end{cases}$$

Unghiurile de rotire:

$$\gamma_1 = -\frac{1}{R_0} \cdot \frac{\partial w}{\partial \xi}; \quad \gamma_2 = -\frac{1}{R_0} \left(\frac{\partial w}{\partial \theta} + v \right).$$

În domeniul elastic există următoarele corelații:

$$(6.172) \quad \begin{cases} T_1 = B \cdot \varepsilon_1; & T_2 = B \cdot \varepsilon_2; & S_1 = B \left(\frac{w}{2} + \frac{h^2}{12} \cdot \frac{\tau}{R_0} \right); \\ S_2 = -B \cdot \frac{w}{2}; & M_1 = -D \cdot \chi_1; & M_2 = -D \cdot \chi_2; \\ N_1 = -N_2 = D \cdot \tau. \end{cases}$$

Cap. 6. Elemente privind calculul rezervoarelor cilindrice

În relațiile anterioare:

$B = E \cdot h$ - rigiditatea axială la compresiune (întindere);

D - rigiditatea la încovoire;

h - grosimea peretelui cilindric.

Coeficientul Poisson ν se consideră egal cu zero în cazul betonului armat.

Relațiile pentru S_1 și S_2 sunt stabilite ⁹⁾ astfel ca a 6 - a ecuație de echilibru din sistemul (6.170) să fie satisfăcută automat.

Atunci sistemul (6.170) poate fi scris și astfel:

$$(6.173) \quad \begin{cases} \frac{\partial T_1}{\partial \xi} - \frac{\partial S_2}{\partial \theta} + R_0 \cdot X = 0; \\ \frac{\partial S_1}{\partial \xi} + \frac{\partial T_2}{\partial \theta} - \frac{1}{R_0} \left(\frac{\partial M_2}{\partial \theta} - \frac{\partial N_1}{\partial \xi} \right) + R_0 Y = 0; \\ T_2 + \frac{1}{R_0} \cdot \frac{\partial}{\partial \xi} \left(\frac{\partial M_1}{\partial \xi} + \frac{\partial N_2}{\partial \theta} \right) + \frac{1}{R_0} \cdot \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\frac{\partial M_2}{\partial \theta} - \frac{\partial N_1}{\partial \xi} \right) + R_0 \cdot Z = 0. \end{cases}$$

Se înlocuiesc mărimile forțelor și momentelor în (6.173), exprimate în funcție de deplasări (6.172) și se determină ecuația de echilibru scrisă în deplasări:

$$(6.174) \quad \begin{cases} \frac{\partial^2 u}{\partial \xi^2} + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 u}{\partial \theta^2} + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 v}{\partial \xi \partial \theta} + \frac{R_0^2}{B} X = 0; \\ \frac{1}{2} \frac{\partial^2 u}{\partial \xi \partial \theta} + \frac{1}{2} \cdot \frac{\partial^2 v}{\partial \xi^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial \theta^2} + a^2 \left(\frac{\partial^2 v}{\partial \xi^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial \theta^2} \right) - \\ - \frac{\partial w}{\partial \theta} + a^2 \left(2 \frac{\partial^3 w}{\partial \xi^2 \partial \theta} + \frac{\partial^3 w}{\partial \theta^3} \right) + \frac{R_0^2 \cdot Y}{B} = 0; \end{cases}$$

$$(6.174) \quad \begin{cases} \frac{\partial v}{\partial \theta} + a^2 \left(\frac{\partial^3 v}{\partial \theta^3} - 2 \frac{\partial^4 v}{\partial \xi^2 \partial \theta^2} \right) + w + a^2 \cdot \nabla^4 w - \frac{R_0^2 \cdot Z}{B} = 0, \\ \text{în care } a^2 = \frac{h^2}{12R_0^2}; \quad \nabla^2 = \frac{\partial^2(\cdot)}{\partial \xi^2} + \frac{\partial^2(\cdot)}{\partial \theta^2}. \end{cases}$$

După cum se observă, rezolvarea sistemului de ecuații în teoria momentelor reprezintă o problemă suficient de complicată.

Pentru început se analizează teoria mai simplă de membrană (fără momente încovoietoare). Considerând în ecuația (6.173) că $M_1 = M_2 = N_1 = N_2 = 0$, se obține sistemul de ecuații în teoria de membrană, în eforturi axiale, fără momente încovoietoare:

$$(6.175) \quad \begin{cases} \frac{\partial T_1}{\partial \xi} + \frac{\partial S}{\partial \theta} + R_0 \cdot X = 0; \\ \frac{\partial S}{\partial \xi} + \frac{\partial T_2}{\partial \theta} + R_0 \cdot Y = 0; \\ T_2 + R_0 \cdot Z = 0, \end{cases}$$

în care $S = S_1 = -S_2$.

Considerând în ecuația (6.174) $a^2 = 0$ se obține sistemul de ecuații în teoria de membrană, exprimate în deplasări:

$$(6.176) \quad \begin{cases} \frac{\partial^2 u}{\partial \xi^2} + \frac{1}{2} \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial \theta^2} + \frac{1}{2} \cdot \frac{\partial^2 v}{\partial \xi \partial \theta} + \frac{R_0^2 X}{B} = 0; \\ \frac{1}{2} \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial \xi \partial \theta} + \frac{1}{2} \cdot \frac{\partial^2 v}{\partial \xi^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial \theta^2} - \frac{\partial w}{\partial \theta} + \frac{R_0^2 Y}{B} = 0; \\ -\frac{\partial v}{\partial \theta} + w - \frac{R_0^2 Z}{B} = 0. \end{cases}$$

Integrarea sistemului (6.175) poate fi realizată prin cuadraturi. Astfel, din ecuația a treia din sistemul (6.175) se obține:

$$(6.177) \quad T_{2b} = -R_0 \cdot Z;$$

- din ecuația a doua:

$$(6.178) \quad S_b = -\int \left(\frac{\partial T_2}{\partial \theta} + R_0 \cdot Y \right) d\xi + f_1(\theta)$$

- din prima ecuație:

$$(6.179) \quad T_{1b} = -\int \left(\frac{\partial S}{\partial \theta} + R_0 \cdot X \right) d\xi + f_2(\theta)$$

Se menționează faptul că $f_1(\theta)$ și $f_2(\theta)$ sunt funcții de integrare arbitrare. Mărimile corespunzătoare rezolvării în teoria de membrană sunt notate suplimentar cu indicele "b".

În continuare, se analizează soluțiile pentru câteva probleme referitoare la încărcările seismice.

6.4.4. PRESIUNEA SEISMICĂ A LICHIDULUI

Conform normelor rusești (SN 326 – 65), diagrama presiunii seismice a lichidului pe o parte cunoscută a înălțimii peretelui se consideră constantă și numai în zona superioară a peretelui scade brusc spre zero.

Pentru simplificarea calculului și în scopul asigurării unei rezistențe trainice/stabile, se consideră că presiunea seismică a lichidului este constantă pe înălțimea peretelui.

În aceste condiții, $Z = q \cdot \cos \theta$; $X = Y = 0$.

Din relația (6.177) se obține:

$$(6.180) \quad T_{2b} = -q \cdot R_0 \cos \theta,$$

iar din (6.178):

$$S_b = -q \cdot R_0 \cdot \xi \cdot \sin \theta + f_1(\theta).$$

Funcția derivată $f_1(\theta)$ se determină din condiții de margine. De exemplu, la **rezervoarele deschise** marginea superioară a plăcii cilindrice este liberă la forțele de **lunecare**, adică pentru $\xi = \xi_0$, $S = 0$.

De aici,

$$(6.181) \quad S_b = q \cdot R_0 (\xi_0 - \xi) \sin \theta$$

în care ξ_0 este coordonata relativă a marginii superioare a plăcii rezervorului; $\xi = 0$ - coordonata corespunzătoare marginii plăcii în zona de legătură cu radierul rezervorului. Conform relației (6.179):

$$T_{1b} = -qR_0 \left(\xi_0 \cdot \xi - \frac{1}{2} \xi^2 \right) \cos \theta + f_2(\theta).$$

Considerând că în **cazul rezervorului deschis** $T_1 (\xi = \xi_0) = 0$, în final, se obține:

$$(6.182) \quad T_{1b} = -qR_0 \left[\xi_0 \cdot \xi - \frac{1}{2} (\xi_0^2 + \xi^2) \right] \cos \theta$$

Se remarcă faptul că pentru existența încărcării uniform distribuite pe marginea superioară a plăcii, adică $T_1 (\xi = \xi_0) = T_{10}$, ultima valoare se însumează cu mărimea T_{1b} determinată cu relația (6.182).

6.4.5. FORȚA CONCENTRATĂ P APLICATĂ CONTINUU PE MARGINEA SUPERIOARĂ A REZERVORULUI

La rezervorul cu acoperiș plan, ca urmare a acțiunii șocului seismic asupra pereților, se produce încărcarea acestora cu forțe

orizontale, cu intensitatea egală cu P ce pot fi distribuite în direcția diametrelor plăcii cilindrice.

Forța P se echilibrează cu forțele de lunecare distribuite în zona de îmbinare dintre acoperiș și peretele cilindric.

Considerând că distribuția acestora poate fi descrisă printr-o lege sinusoidală se obține:

$$(6.183) \quad S(\xi = \xi_0) = \frac{P}{\pi R_0} \sin \theta$$

Utilizând acum relațiile (6.177) ... (6.179), se determină:

$$(6.184) \quad \begin{cases} T_{2b} = 0; \\ S_b = f_1(\theta) = \frac{P}{\pi R_0} \sin \theta; \\ T_{1b} = \frac{P}{\pi R_0} (\xi_0 - \xi) \cos \theta. \end{cases}$$

6.4.6. DETERMINAREA DEPLASĂRII DUPĂ TEORIILE DE MEMBRANĂ ȘI DE ÎNCOVOIERE

Folosind relațiile de legătură, bazate pe legea Hooke (relațiile (6.172), se pot obține ușor deplasările u , v și w :

$$(6.185) \quad u_b = \frac{R_0}{B} \int T_{1b} d\xi + f_3(\theta)$$

$$(6.186) \quad v_b = \int \left(\frac{2S \cdot R_0}{B} - \frac{\partial u}{\partial \theta} \right) d\xi + f_4(\theta)$$

$$(6.187) \quad w_b = \frac{\partial}{\partial \theta} - \frac{T_2 \cdot R_0}{B}.$$

Funcțiile de integrare arbitrarie $f_3(\theta)$ și $f_4(\theta)$ intră numai în relațiile pentru deplasări, de aceea starea de eforturi din placă nu depinde de acestea.

Sistemul de ecuații din teoria de membrană, scris în deplasări (6.176), are un grad mai înalt decât sistemul (6.175) exprimat în eforturi. De aici rezultă că soluția sistemului (6.176) va fi mult mai complicată decât cea a sistemului (6.175).

Derivând ¹⁰⁾ prima ecuație (6.176) în raport cu ξ , iar a doua în raport cu θ , respectiv scăzând din prima rezultatul celei de a doua, se obține:

$$(6.188) \quad \frac{\partial^3 u_b}{\partial \xi^3} - \frac{\partial^3 v_b}{\partial \theta^3} + \frac{\partial^2 w_b}{\partial \theta^2} = 0$$

Acum, derivând de două ori a treia ecuație din sistemul (6.176) după θ și scăzând rezultatul din (6.188) se obține:

$$(6.189) \quad \frac{\partial^3 u_b}{\partial \xi^3} + \frac{R_0^2}{B} \cdot \frac{\partial^2 Z}{\partial \theta^2} = 0$$

Prin integrarea ultimului rezultat (6.189) se stabilește deplasarea:

$$(6.190) \quad u_b = -\frac{R_0^2}{B} \cdot \frac{\partial^2 Z}{\partial \theta^2} \cdot \frac{\xi^3}{6} + f_1(\theta) \frac{\xi^2}{2} + f_2(\theta) \cdot \xi + f_3(\theta)$$

Din prima ecuație a sistemului (6.176) se obține deplasarea:

$$(6.191) \quad v_b = \frac{R_0^2}{B} \left(\xi^2 \frac{\partial Z}{\partial \theta} + \frac{1}{24} \xi^4 \frac{\partial^3 Z}{\partial \theta^3} \right) - 2\xi \int f_1(\theta) d\theta - \frac{1}{6} \xi^3 \frac{df_1(\theta)}{d\theta} - \frac{1}{2} \xi^2 \frac{df_2(\theta)}{d\theta} - \xi \frac{df_3(\theta)}{d\theta} + \int f_4(\theta) d\theta + c.$$

Deplasarea w se determină din ecuația a treia din sistemul (6.176):

$$(6.192) \quad w_b = \frac{\partial v_b}{\partial \theta} + \frac{R_0^2}{B} \cdot Z = \frac{R_0^2}{B} \left(Z + \xi^2 \frac{\partial^2 Z}{\partial \theta^2} + \frac{1}{24} \xi^4 \frac{\partial^4 Z}{\partial \theta^4} \right) - 2\xi \cdot f_1(\theta) - \frac{1}{6} \xi^3 \frac{d^2 f_1(\theta)}{d\theta^2} - \frac{1}{2} \xi^2 \frac{d^2 f_2(\theta)}{d\theta^2} - \xi \frac{d^2 f_3}{d\theta^2} + f_4(\theta).$$

În relațiile precedente $f_1(\theta)$, ..., $f_4(\theta)$ și c sunt funcții de integrare arbitrarie.

Cu ajutorul relațiilor (6.171) și (6.172) și a deplasărilor obținute se determină, în continuare, deformările și forțele din placă:

$$(6.193) \quad \begin{cases} \varepsilon_{1b} = \frac{1}{R_0} \frac{\partial u_b}{\partial \xi} = -\frac{R_0}{B} \cdot \frac{\partial^2 Z}{\partial \theta^2} \cdot \frac{\xi^2}{2} + \frac{1}{R_0} \cdot f_1(\theta) \cdot \xi + \frac{1}{R_0} \cdot f_2(\theta); \\ \varepsilon_{2b} = -\frac{R_0}{B} \cdot Z; \\ w_b = \frac{2R_0}{B} \cdot \xi \cdot \frac{\partial Z}{\partial \theta} - \frac{2}{R_0} \int f_1(\theta) d\theta. \end{cases}$$

$$(6.194) \quad \begin{cases} T_{1b} = -R_0 \frac{\partial^2 Z}{\partial \theta^2} \cdot \frac{\xi^2}{2} + \frac{B}{R_0} f_1(\theta) \cdot \xi + \frac{B}{R_0} \cdot f_2(\theta); \end{cases}$$

$$(6.194) \quad \begin{cases} T_{2b} = -R_0 \cdot Z; \\ S_b = R_0 \cdot \frac{\partial Z}{\partial \theta} \cdot \xi - \frac{B}{R_0} \int f_1(\theta) d\theta. \end{cases}$$

Admițând că u_b ($\xi = 0$) și v_b ($\xi = 0$) sunt egale cu zero, atunci, în acord cu expresiile (6.190) și (6.191), $f_3(\theta) = f_4(\theta) = 0$.

Ca urmare, într-un punct oarecare al plăcii, deplasările pot fi determinate cu relațiile:

$$(6.195) \quad u_b = -\frac{R_0^2}{B} \frac{\partial^2 Z}{\partial \theta^2} \cdot \frac{\xi^3}{6} + f_1(\theta) \frac{\xi^2}{2} + f_2(\theta) \cdot \xi;$$

$$(6.196) \quad v_b = \frac{R_0^2}{B} \left(\xi^2 \frac{\partial Z}{\partial \theta} + \frac{\xi^4}{24} \cdot \frac{\partial^3 Z}{\partial \theta^3} \right) - 2\xi \int f_1(\theta) d\theta - \frac{\xi^3}{6} \cdot \frac{df_1(\theta)}{d\theta} - \frac{\xi^2}{2} \frac{df_2(\theta)}{d\theta};$$

$$(6.197) \quad w_b = \frac{R_0^2}{B} \left(Z + \xi^2 \frac{\partial^2 Z}{\partial \theta^2} + \frac{1}{24} \xi^4 \frac{\partial^4 Z}{\partial \theta^4} \right) - 2\xi \cdot f_1(\theta) - \frac{1}{6} \cdot \xi^3 \cdot \frac{d^2 f_2(\theta)}{d\theta^2} - \frac{1}{2} \xi^2 \cdot \frac{d^2 f_2(\theta)}{d\theta^2}.$$

Celelalte funcții arbitrare se determină din condițiile pe marginea superioară a plăcii.

Admitem că:

$$(6.198) \quad T_1(\xi_0) = 0; \quad S(\xi_0) = 0$$

Folosind condiția (6.198) în relația a treia din (6.194), se obține:

$$(6.199) \quad f_1(\theta) = \frac{R_0^2}{B} \cdot \xi_0 \frac{\partial^2 Z}{\partial \theta^2}, \text{ și, prin urmare,}$$

$$(6.200) \quad S_b = -R_0 \frac{\partial Z}{\partial \theta} (\xi_0 - \xi)$$

Înlocuind mărimea $f_1(\theta)$ din (6.199) în prima relație din (6.194) și ținând cont de (6.198), rezultă ⁽¹⁾:

$$(6.201) \quad f_2(\theta) = -\frac{R_0^2}{B} \cdot \frac{\xi_0^2}{2} \frac{\partial^2 Z}{\partial \theta^2}$$

În concluzie,

$$(6.202) \quad T_{1b} = R_0 \frac{\partial^2 Z}{\partial \theta^2} \left[\xi_0 \xi - \frac{1}{2} (\xi_0^2 + \xi^2) \right].$$

În ceea ce privește T_{2b} și teoria de membrană, această forță nu depinde de condițiile de margine și din a doua relație (6.194):

$$(6.203) \quad T_{2b} = -R_0 \cdot Z$$

Înlocuind $f_1(\theta)$ și $f_2(\theta)$ în relațiile pentru deplasări, în final, rezultă:

$$(6.195.a) \quad u_b = \frac{R_0^2}{2B} \cdot \frac{\partial^2 Z}{\partial \theta^2} \left(\xi_0 \xi^2 - \xi_0^2 \xi - \frac{1}{3} \xi^3 \right);$$

$$(6.196.a) \quad v_b = -\frac{R_0^2}{B} \left[\frac{\partial Z}{\partial \theta} \left(2\xi_0 \xi - \xi^2 \right) + \frac{\partial^3 Z}{\partial \theta^3} \left(\frac{1}{6} \xi_0 \xi^3 - \frac{1}{4} \xi_0^2 \xi^2 - \frac{1}{24} \xi^4 \right) \right];$$

$$(6.197.a) \quad w_b = \frac{R_0^2}{B} \left[Z - \frac{\partial^2 Z}{\partial \theta^2} \left(2\xi_0 \xi - \xi^2 \right) - \frac{\partial^4 Z}{\partial \theta^4} \left(\frac{1}{6} \xi_0 \xi^3 - \frac{1}{4} \xi_0^2 \xi^2 - \frac{1}{24} \xi^4 \right) \right]$$

În etapa următoare se trece la stabilirea soluției ecuației de echilibru în **teoria de încovoire**.

Pentru aceasta vom avea în vedere faptul că soluțiile anterioare obținute pe baza teoriei de membrană pot fi considerate drept integrale particulare ale ecuațiilor neomogene (cu termen liber) din teoria de încovoire.

Pentru aceasta, în continuare, se vor rezolva ecuațiile neomogene ale teoriei de încovoire.

Neglijând (conform teoriei lui U. Z. Vlasov) termenii de ordin mic ce conțin factorul a^2 , în loc de (6.174), pentru $X = Y = Z = 0$, se obține:

$$(6.204) \quad \begin{cases} \frac{\partial^2 u}{\partial \xi^2} + \frac{1}{2} \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial \theta^2} + \frac{1}{2} \cdot \frac{\partial^2 v}{\partial \xi \partial \theta} = 0; \\ \frac{1}{2} \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial \xi \partial \theta} + \frac{1}{2} \cdot \frac{\partial^2 v}{\partial \xi^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial \theta^2} - \frac{\partial w}{\partial \theta} = 0; \\ -\frac{\partial v}{\partial \theta} + w + a^2 \cdot \nabla^4 w = 0. \end{cases}$$

Sistemul (6.204), după cum este cunoscut, se reduce la o **ecuație echivalentă** cu ajutorul unei funcții $\phi(\xi, \theta)$.

În aceste condiții, deplasările u , v și w se determină cu relațiile:

$$(6.205) \quad \begin{cases} u = -\frac{\partial^3 \phi}{\partial \xi \partial \theta^2}; \\ v = \frac{\partial^3 \phi}{\partial \theta^3} + 2 \frac{\partial^3 \phi}{\partial \xi^2 \partial \theta}; \\ w = \nabla^4 \phi. \end{cases}$$

Înlocuind (6.205) în (6.204), se constată faptul că primele două ecuații se satisfac identic, iar ce-a treia dă ecuația rezolvantă în raport cu funcția ϕ .

$$(6.206) \quad \nabla^4 \nabla^4 \phi + \frac{1}{a^2} \cdot \frac{\partial^4 \phi}{\partial \xi^4} = 0$$

sau sub formă desfășurată:

$$(6.206.a) \quad \begin{aligned} & \frac{\partial^8 \phi}{\partial \xi^8} + 4 \frac{\partial^8 \phi}{\partial \xi^6 \partial \theta^2} + 6 \frac{\partial^8 \phi}{\partial \xi^4 \partial \theta^4} + 4 \frac{\partial^8 \phi}{\partial \xi^2 \partial \theta^6} + \\ & + \frac{\partial^8 \phi}{\partial \theta^8} + \frac{1}{a^2} \frac{\partial^4 \phi}{\partial \xi^4} = 0 \end{aligned}$$

Determinând din (6.206) sau din (6.206.a) funcția ϕ cu ajutorul expresiei (6.205) și formulelor (6.171) și (6.172), se obțin forțele ¹²⁾ și momentele:

$$(6.207) \quad \left\{ \begin{array}{l} T_{10} = -\frac{B}{R_0} \cdot \frac{\partial^4 \phi}{\partial \xi^2 \partial \theta^2}; \quad T_{20} = -\frac{B}{R_0} \cdot \frac{\partial^4 \phi}{\partial \xi^4}; \\ S_0 = S_{10} = -S_{20} = \frac{B}{R_0} \cdot \frac{\partial^4 \phi}{\partial \xi^3 \partial \theta}; \\ M_{10} = -\frac{D}{R_0^2} \cdot \frac{\partial^2}{\partial \xi^2} \nabla^4 \phi; \quad M_{20} = -\frac{D}{R_0^2} \cdot \frac{\partial^2}{\partial \theta^2} \nabla^4 \phi; \\ N_0 = N_{10} = -N_{20} = -\frac{D}{R_0^2} \cdot \frac{\partial^2}{\partial \xi \partial \theta} \nabla^4 \phi. \end{array} \right.$$

În formulele pentru M_{20} și N_0 sunt considerate numai derivatele deplasărilor normale w .

Prin indicele "0" se reprezintă mărimea obținută prin **rezolvarea sistemului de ecuații omogene**.

În literatura de specialitate este demonstrat faptul că ecuația (6.206) poate fi redusă la un cvadruplu de ecuații diferențiale de ordinul 2, echivalent cu aceasta:

$$(6.208) \quad \nabla^2 \phi_n \pm \lambda(1 \pm i) \frac{\partial \phi_n}{\partial \xi} = 0,$$

în care $n = 1, \dots, 4$, iar

$$(6.209) \quad \lambda = 4 \sqrt{\frac{3R_0^2}{h^2}}.$$

Nu este greu de observat că este suficient să se rezolve ecuația (6.208) pentru o valoare oarecare a lui n .

Soluțiile, corespunzătoare valorilor rămase, pot fi scrise în mod automat sub forma funcțiilor complexe dublu conjugate.

Se poate reprezenta funcția ϕ_1 ($n = 1$) sub forma unui produs de două funcții

$$(6.210) \quad \phi_1 = f_1(\xi) \cdot \varphi_1(\theta),$$

fiecare depinzând numai de o singură variabilă independentă.

Referitor la cazul de încărcare indicat în fig. 6. 23, se consideră:

$$(6.211) \quad \varphi(\theta) = \cos \theta.$$

Rezultă:

$$(6.212) \quad \phi_1 = f_1(\xi) \cdot \cos \theta.$$

Înlocuind (6.212) în ecuația (6.208), după simplificarea factorului comun $\cos \theta$, rezultă:

$$(6.213) \quad f_1'' + \lambda(1+i)f_1' - f_1 = 0.$$

În relația precedentă, ghilimelele indică derivatele după argumentul ξ .

Ecuația (6.213) este o ecuație ordinară de ordinul doi.

Considerând că funcția oscilatoare f trebuie să se amortizeze rapid (crescătoare), funcția f în comparație cu derivatele sale de ordin superior poate fi neglijată.

Pornind de la (6.213) se obține:

$$(6.213.a) \quad f_1'' + \lambda(1+i)f_1' = 0.$$

Corespunzător (6.213.a) ecuația caracteristică va fi:

$$(6.214) \quad k^2 + k\lambda(1+i) = 0,$$

cu rădăcinile care se determină după formula:

$$k_1 = 0, \quad k_2 = -\lambda(1+i).$$

În mod corespunzător, funcția $f_1(\xi)$ capătă aspectul

$$(6.215) \quad f_1(\xi) = c_1 + c_2 \cdot e^{-\lambda(1+i)\xi}$$

sau

$$(6.215.a) \quad f_1(\xi) = c_1 + c_2 \cdot e^{-\lambda\xi} \cdot (\cos \lambda\xi + i \sin \lambda\xi),$$

în care c_1 și c_2 sunt constante de integrare.

Așa după cum s-a arătat mai sus, rezolvarea completă se desfășoară în mod analog pentru $n = 2, 3, 4$.

Combinatia liniară a acestor patru soluții conduce la soluția aproximativă a ec. (6.208) în forma finală:

$$(6.216) \quad f(\xi) = c_1 \cdot \eta_1 + c_2 \cdot \eta_2 + c_3 \cdot \bar{\eta}_1 + c_4 \cdot \bar{\eta}_2$$

în care $c_1, \dots, c_4$ sunt constante arbitrare de integrare, iar funcțiile $\eta_1, \dots, \eta_2$, în esență, sunt cele considerate pentru rezolvarea problemei privind calculul plăcilor încărcate local cu încărcări axial simetrice (formula 6.215, cu $\lambda\xi = \varphi$).

Astfel:

$$(6.217) \quad \begin{cases} \eta_1 = e^{-\lambda\xi} \cdot \cos \lambda\xi; & \eta_2 = e^{-\lambda\xi} \cdot \sin \lambda\xi \\ \bar{\eta}_1 = e^{\lambda\xi} \cdot \cos \lambda\xi; & \bar{\eta}_2 = e^{\lambda\xi} \cdot \sin \lambda\xi \end{cases}$$

în care e este baza logaritmului natural.

În expresia (6.210) toate integralele corespunzătoare rădăcinilor caracteristice nule ale ecuației sunt **înlăturate**.

Mai departe, se poate arăta că funcția $f(\xi)$ corespunde funcției de oscilație rapidă amortizată (crescătoare). Aceasta se descrie prin $\eta_1, \dots, \eta_2$.

Prima pereche din aceste funcții descrie starea de eforturi și deformații în apropierea unei regiuni a plăcii, iar a doua pereche – în apropierea celei de-a doua.

La plăcile cilindrice lungi influența reciprocă a perturbațiilor marginilor/regiunilor se neglijează.

Asta înseamnă că în expresia (6.216) se poate păstra numai perechea de funcții, de exemplu, η_1 și η_2 , adică efectul considerat se amortizează pe măsura îndepărtării de margine, determinată de coordonata $\xi = 0$:

$$(6.216.a) \quad f(\xi) = c_1 \cdot \eta_1 + c_2 \cdot \eta_2.$$

În consecință, funcția ϕ se reprezintă, conform (6.210), sub forma:

$$(6.218) \quad \phi = (c_1 \cdot \eta_1 + c_2 \cdot \eta_2) \cos \theta.$$

Mai departe se exprimă derivatele funcțiilor arbitrare η_1 și η_2 :

$$(6.219) \quad \begin{cases} \dot{\eta}_1 = -\lambda(\eta_1 + \eta_2); & \dot{\eta}_2 = +\lambda(\eta_1 - \eta_2); \\ \ddot{\eta}_1 = 2\lambda^2 \cdot \eta_2; & \ddot{\eta}_2 = -2\lambda^2 \cdot \eta_1; \\ \dddot{\eta}_1 = 2\lambda^3(\eta_1 - \eta_2); & \dddot{\eta}_2 = 2\lambda^3(\eta_1 + \eta_2); \\ \eta_1^{IV} = -4\lambda^4 \cdot \eta_1; & \eta_2^{IV} = -4\lambda^4 \cdot \eta_2. \end{cases}$$

Cunoscând $\phi(\xi, \theta)$ din formula (6.185) se determină deplasările:

$$(6.220) \quad \begin{cases} u_0 = [c_1(-\eta_1 - \eta_2) + c_2(\eta_1 - \eta_2)] \cdot \lambda \cdot \cos \theta; \\ v_0 = [c_1(\eta_1 - 4\lambda^2 \eta_2) + c_2(\eta_2 + 4\lambda^2 \eta_1)] \cdot \sin \theta; \\ w_0 = \{c_1[(1 - 4\lambda^4)\eta_1 - 4\lambda^2 \eta_2] + c_2[(1 - 4\lambda^4)\eta_2 + 4\lambda^2 \eta_1]\} \cos \theta, \end{cases}$$

iar din formula (6.207) – forțele și momentele încovoietoare ¹³⁾:

$$(6.221) \quad \begin{cases} T_{10} = 2\lambda^2 \frac{B}{R_0} (c_1 \cdot \eta_2 - c_2 \cdot \eta_1) \cos \theta; \\ T_{20} = 4\lambda^4 \frac{B}{R_0} (c_1 \cdot \eta_1 + c_2 \cdot \eta_2) \cos \theta; \\ S_0 = -2\lambda^3 \frac{B}{R_0} [c_1(\eta_1 - \eta_2) + c_2(\eta_1 + \eta_2)] \sin \theta; \\ M_{10} = -2\lambda^2 \frac{D}{R_0^2} \{ c_1[(1 - 4\lambda^4)\eta_2 + 4\lambda^2 \cdot \eta_1] + \\ + c_2[-(1 - 4\lambda^4)\eta_1 + 4\lambda^2 \cdot \eta_2] \} \cos \theta; \end{cases}$$

$$(6.221) \quad \begin{cases} M_{20} = \frac{D}{R_0^2} \{ c_1[(1 - 4\lambda^4)\eta_1 - 4\lambda^2 \cdot \eta_2] + \\ + c_2[(1 - 4\lambda^4)\eta_2 + 4\lambda^2 \cdot \eta_1] \} \cos \theta; \\ N_0 = \lambda \frac{D}{R_0^2} \{ c_1[(1 - 4\lambda^4)(-\eta_1 - \eta_2) - 4\lambda^2(\eta_1 - \eta_2)] + \\ + c_2[(1 - 4\lambda^4)(\eta_1 - \eta_2) - 4\lambda^2(\eta_1 + \eta_2)] \} \sin \theta. \end{cases}$$

După cum s-a menționat mai sus, în formulele (6.220) și (6.221), indicele "0" indică faptul că mărimea respectivă este determinată pe baza soluției ecuației omogene.

Mentținându-ne în limite acceptabile de exactitate ale soluțiilor, în formulele (6.220) și (6.221) urmează să se păstreze numai termenii care ca factori mărimi considerabil mai mari ca unitatea. Astfel:

$$(6.222) \quad \begin{cases} u_0 = \lambda[c_1(-\eta_1 - \eta_2) + c_2(\eta_1 - \eta_2)] \cos \theta; \\ v_0 = 4\lambda^2(-c_1 \cdot \eta_2 + c_2 \cdot \eta_1) \sin \theta; \\ w_0 = 4\lambda^4(-c_1 \cdot \eta_1 - c_2 \cdot \eta_2) \cos \theta. \end{cases}$$

Forțele T_{10} , T_{20} și S_0 păstrează aspectul anterior – (6.221), dar

$$(6.223) \quad \begin{cases} M_{10} = -8\lambda^6 \frac{D}{R_0^2} (-c_1 \cdot \eta_2 + c_2 \cdot \eta_1) \cos \theta; \\ M_{20} = 4\lambda^4 \frac{D}{R_0^2} (-c_1 \cdot \eta_1 - c_2 \cdot \eta_2) \cos \theta; \\ N_0 = 4\lambda^5 \frac{D}{R_0^2} [c_1(\eta_1 + \eta_2) - c_2(\eta_1 - \eta_2)] \sin \theta. \end{cases}$$

$$(6.219) \quad \begin{cases} \dot{\eta}_1 = -\lambda(\eta_1 + \eta_2); & \dot{\eta}_2 = +\lambda(\eta_1 - \eta_2); \\ \ddot{\eta}_1 = 2\lambda^2 \cdot \eta_2; & \ddot{\eta}_2 = -2\lambda^2 \cdot \eta_1; \\ \dddot{\eta}_1 = 2\lambda^3(\eta_1 - \eta_2); & \dddot{\eta}_2 = 2\lambda^3(\eta_1 + \eta_2); \\ \eta_1^{IV} = -4\lambda^4 \cdot \eta_1; & \eta_2^{IV} = -4\lambda^4 \cdot \eta_2. \end{cases}$$

Cunoscând $\phi(\xi, \theta)$ din formula (6.185) se determină deplasările:

$$(6.220) \quad \begin{cases} u_0 = [c_1(-\eta_1 - \eta_2) + c_2(\eta_1 - \eta_2)] \cdot \lambda \cdot \cos \theta; \\ v_0 = [c_1(\eta_1 - 4\lambda^2 \eta_2) + c_2(\eta_2 + 4\lambda^2 \eta_1)] \cdot \sin \theta; \\ w_0 = \{c_1[(1 - 4\lambda^4)\eta_1 - 4\lambda^2 \eta_2] + c_2[(1 - 4\lambda^4)\eta_2 + 4\lambda^2 \eta_1]\} \cos \theta, \end{cases}$$

iar din formula (6.207) – forțele și momentele încovoietoare ¹³⁾:

$$(6.221) \quad \begin{cases} T_{10} = 2\lambda^2 \frac{B}{R_0} (c_1 \cdot \eta_2 - c_2 \cdot \eta_1) \cos \theta; \\ T_{20} = 4\lambda^4 \frac{B}{R_0} (c_1 \cdot \eta_1 + c_2 \cdot \eta_2) \cos \theta; \\ S_0 = -2\lambda^3 \frac{B}{R_0} [c_1(\eta_1 - \eta_2) + c_2(\eta_1 + \eta_2)] \sin \theta; \\ M_{10} = -2\lambda^2 \frac{D}{R_0^2} \{ c_1 [(1 - 4\lambda^4)\eta_2 + 4\lambda^2 \cdot \eta_1] + \\ + c_2 [-(1 - 4\lambda^4)\eta_1 + 4\lambda^2 \cdot \eta_2] \} \cos \theta; \end{cases}$$

$$(6.221) \quad \begin{cases} M_{20} = \frac{D}{R_0^2} \{ c_1 [(1 - 4\lambda^4)\eta_1 - 4\lambda^2 \cdot \eta_2] + \\ + c_2 [(1 - 4\lambda^4)\eta_2 + 4\lambda^2 \cdot \eta_1] \} \cos \theta; \\ N_0 = \lambda \frac{D}{R_0^2} \{ c_1 [(1 - 4\lambda^4)(-\eta_1 - \eta_2) - 4\lambda^2(\eta_1 - \eta_2)] + \\ + c_2 [(1 - 4\lambda^4)(\eta_1 - \eta_2) - 4\lambda^2(\eta_1 + \eta_2)] \} \sin \theta. \end{cases}$$

După cum s-a menționat mai sus, în formulele (6.220) și (6.221), indicele "0" indică faptul că mărimea respectivă este determinată pe baza soluției ecuației omogene.

Mentținându-ne în limite acceptabile de exactitate ale soluțiilor, în formulele (6.220) și (6.221) urmează să se păstreze numai termenii care au ca factori mărimi considerabil mai mari ca unitatea. Astfel:

$$(6.222) \quad \begin{cases} u_0 = \lambda [c_1(-\eta_1 - \eta_2) + c_2(\eta_1 - \eta_2)] \cos \theta; \\ v_0 = 4\lambda^2 (-c_1 \cdot \eta_2 + c_2 \cdot \eta_1) \sin \theta; \\ w_0 = 4\lambda^4 (-c_1 \cdot \eta_1 - c_2 \cdot \eta_2) \cos \theta. \end{cases}$$

Forțele T_{10} , T_{20} și S_0 păstrează aspectul anterior – (6.221), dar

$$(6.223) \quad \begin{cases} M_{10} = -8\lambda^6 \frac{D}{R_0^2} (-c_1 \cdot \eta_2 + c_2 \cdot \eta_1) \cos \theta; \\ M_{20} = 4\lambda^4 \frac{D}{R_0^2} (-c_1 \cdot \eta_1 - c_2 \cdot \eta_2) \cos \theta; \\ N_0 = 4\lambda^5 \frac{D}{R_0^2} [c_1(\eta_1 + \eta_2) - c_2(\eta_1 - \eta_2)] \sin \theta. \end{cases}$$

După cum s-a arătat mai sus, stările complete de eforturi și deformări ale peretelui cilindric se determină ca sumă a rezultatelor obținute pe baza soluției ecuației fără momente și respectiv a teoriei momentelor încovoietoare, adică:

$$(6.224) \quad \begin{cases} u = u_o + u_b; & v = v_o + v_b; & w = w_o + w_b; \\ T_1 = T_{10} + T_{1b}; & T_2 = T_{20} + T_{2b}; & S = S_o + S_b; \\ M_1 = -\frac{D}{R_o^2} \cdot \frac{\partial^2 w}{\partial \xi^2}; & M_2 = -\frac{D}{R_o^2} \cdot \frac{\partial^2 w}{\partial \theta^2}; \\ N = N_1 = -N_2 = -\frac{D}{R_o^2} \cdot \frac{\partial^2 w}{\partial \xi \partial \theta}. \end{cases}$$

Ca soluții ale ecuațiilor teoriei de membrană se consideră soluțiile corespunzătoare încărcării considerate (a se vedea fig. 6.23), atunci în formulele corespunzătoare urmează să se considere $Z = q \cdot \cos \theta$, după care expresia (6.224) capătă aspectul ^{14), 15)}:

$$(6.225) \quad \begin{cases} u = \lambda [c_1(-\eta_1 - \eta_2) + c_2(\eta_1 - \eta_2)] \cos \theta - \frac{qR_o^2}{2B} \cdot \left(\xi_o \xi^2 - \xi_o^2 \xi - \frac{1}{3} \xi^3 \right) \cos \theta; \\ v = \left[4\lambda^2 (-c_1 \cdot \eta_2 + c_2 \cdot \eta_1) + \frac{qR_o^2}{B} \left(2\xi_o \xi - \xi^2 - \frac{1}{6} \cdot \xi_o \cdot \xi^3 + \frac{1}{4} \cdot \xi_o^2 \cdot \xi^2 + \frac{1}{24} \xi^4 - \xi^2 \right) \right] \sin \theta; \end{cases}$$

$$(6.225) \quad \begin{cases} w = \left[4\lambda^4 (-c_1 \eta_1 - c_2 \eta_2) + \frac{qR_o^2}{B} \left(1 + 2\xi_o \xi - \xi^2 - \frac{1}{6} \xi_o \xi^3 + \frac{1}{4} \xi_o^2 \xi^2 + \frac{1}{24} \xi^4 \right) \right] \cos \theta; \\ T_1 = \left\{ 2\lambda^2 \frac{B}{R_o} (c_1 \eta_2 - c_2 \eta_1) - qR_o \left[\xi_o \xi - \frac{1}{2} (\xi_o^2 + \xi^2) \right] \right\} \cos \theta; \\ T_2 = \left[4\lambda^4 \frac{B}{R_o} (c_1 \eta_1 + c_2 \eta_2) - qR_o \right] \cos \theta; \\ S = \left\{ -2\lambda^3 \frac{B}{R_o} [c_1(\eta_1 - \eta_2) + c_2(\eta_1 + \eta_2)] + qR_o (\xi_o - \xi) \right\} \sin \theta; \\ M_1 = - \left[8\lambda^6 \cdot \frac{D}{R_o^2} (-c_1 \eta_2 + c_2 \eta_1) + \frac{qh^2}{12} \left(-2 + \frac{1}{2} \xi_o^2 - \xi_o \xi + \frac{1}{2} \xi^2 \right) \right] \cos \theta; \\ M_2 = \left[4\lambda^4 \cdot \frac{D}{R_o^2} (-c_1 \eta_1 - c_2 \eta_2) + \frac{qh^2}{12} \left(1 + 2\xi_o \xi - \xi^2 - \frac{1}{6} \xi_o \xi^3 + \frac{1}{4} \xi_o^2 \xi^2 + \frac{1}{24} \xi^4 \right) \right] \cos \theta; \end{cases}$$

$$(6.225) \quad \left\{ \begin{aligned} N = & \left\{ 4\lambda^5 \frac{D}{R_0^2} [c_1(\eta_1 + \eta_2) - c_2(\eta_1 - \eta_2)] + \right. \\ & \left. + \frac{qh^2}{12} \left[2(\xi_0 - \xi) + \frac{1}{2}(\xi_0^2 \xi - \xi_0 \xi^2) + \frac{1}{6} \xi^3 \right] \right\} \sin \theta. \end{aligned} \right.$$

Se consideră că la nivelul legăturilor peretelui cu radierul rezervorului deplasările normale w și unghiul de rotire v sunt egale cu zero, adică $w(\xi = 0) = 0$, $v = \frac{1}{R_0} \cdot \frac{\partial w}{\partial \xi}(\xi = 0) = 0$ (legătura perete - radier este rigidă).

Prin urmare, considerând că

$$(6.226) \quad \left\{ \begin{aligned} \xi &= 0, \\ -4\lambda^4 c_1 + \frac{qR_0^2}{B} &= 0, \\ 4\lambda^5 (c_1 - c_2) + \frac{2qR_0^2 \xi_0}{B} &= 0, \end{aligned} \right.$$

se obțin:

$$(6.227) \quad c_1 = \frac{qR_0^2}{4B\lambda^4}; \quad c_2 = \frac{qR_0^2}{4B\lambda^4} \left(1 + \frac{2\xi_0}{\lambda} \right).$$

Înlocuind mărimile obținute pentru c_1 și c_2 în formula (6.225), rezultă:

$$(6.228) \quad \left\{ \begin{aligned} u &= \frac{qR_0^2}{2B} \left\{ \frac{1}{2\lambda^3} \left[-\eta_1 - \eta_2 + \left(1 + \frac{2\xi_0}{\lambda} \right) (\eta_1 - \eta_2) \right] - \right. \\ & \quad \left. - \left(\xi_0 \xi^2 - \xi_0^2 \xi - \frac{1}{3} \xi^3 \right) \right\} \cos \theta; \\ v &= \frac{qR_0^2}{B} \left\{ \frac{1}{\lambda^2} \left[-\eta_2 + \left(1 + \frac{2\xi_0}{\lambda} \right) \eta_1 \right] + 2\xi_0 \xi - \right. \\ & \quad \left. - \frac{1}{6} \xi_0 \xi^3 + \frac{1}{4} \xi_0^2 \xi^2 + \frac{1}{24} \xi^4 \right\} \sin \theta; \\ w &= \frac{qR_0^2}{B} \left[-\eta_1 - \left(1 + \frac{2\xi_0}{\lambda} \right) \eta_2 + 1 + 2\xi_0 \xi - \xi^2 - \right. \\ & \quad \left. - \frac{1}{6} \xi_0 \xi^3 + \frac{1}{4} \xi_0^2 \xi + \frac{1}{24} \xi^4 \right] \cos \theta; \\ T_1 &= -qR_0 \left\{ \frac{1}{2\lambda^2} \left[\eta_2 - \left(1 + \frac{2\xi_0}{\lambda} \right) \eta_1 \right] - \left[\xi_0 \xi - \frac{1}{2} (\xi_0^2 + \xi^2) \right] \right\} \cos \theta; \\ T_2 &= qR_0 \left[-1 + \eta_1 + \left(1 + \frac{2\xi_0}{\lambda} \right) \eta_2 \right] \cos \theta; \\ S &= -\frac{qR_0}{2\lambda} \left[\eta_1 - \eta_2 + \left(1 + \frac{2\xi_0}{\lambda} \right) (\eta_1 + \eta_2) - 2\lambda (\xi_0 - \xi) \right] \sin \theta; \\ M_1 &= -\frac{qh^2 \lambda^2}{6} \left[-\eta_2 + \left(1 + \frac{2\xi_0}{\lambda} \right) \eta_1 + \frac{1}{2\lambda^2} \left(-2 + \frac{1}{2} \xi_0^2 - \right. \right. \\ & \quad \left. \left. - \xi_0 \xi + \frac{1}{2} \xi^2 \right) \right] \cos \theta; \end{aligned} \right.$$

$$(6.228) \left\{ \begin{aligned} M_2 &= \frac{qh^2}{12} \left[-\eta_1 - \left(1 + \frac{2\xi_0}{\lambda} \right) \eta_2 + 1 + 2\xi_0\xi - \xi^2 - \right. \\ &\quad \left. - \frac{1}{6} \xi_0\xi^3 + \frac{1}{4} \xi_0^2\xi^2 + \frac{1}{24} \xi^4 \right] \cos \theta; \\ N &= \frac{qh^2}{12} \left\{ \lambda \left[(\eta_1 + \eta_2) - \left(1 + \frac{2\xi_0}{\lambda} \right) (\eta_1 - \eta_2) \right] + \right. \\ &\quad \left. + 2(\xi_0 - \xi) + \frac{1}{2} (\xi_0^2\xi - \xi_0\xi^2) + \frac{1}{6} \xi^3 \right\} \sin \theta. \end{aligned} \right.$$

După cum se observă, anumite mărimi din formulele anterioare conțin termeni multiplicați cu $\frac{1}{\lambda^2}$, termeni care pot fi neglijăți.

Ca urmare, **formulele finale de calcul** capătă următorul aspect:

$$(6.229) \left\{ \begin{aligned} u &= -\frac{qR_0}{2B} \left(\xi_0\xi^2 - \xi_0^2\xi - \frac{1}{3} \xi^3 \right) \cos \theta; \\ v &= \frac{qR_0^2}{B} \left(2\xi_0\xi - \frac{1}{6} \xi_0\xi^3 + \frac{1}{4} \xi_0^2\xi + \frac{1}{24} \xi^4 \right) \sin \theta; \\ w &= \frac{qR_0^2}{B} \left[-\eta_1 - \left(1 + \frac{2\xi_0}{\lambda} \right) \eta_2 + 1 + 2\xi_0\xi - \xi^2 - \right. \\ &\quad \left. - \frac{1}{6} \xi_0\xi^3 + \frac{1}{4} \xi_0^2\xi^2 + \frac{1}{24} \xi^4 \right] \cos \theta; \\ T_1 &= qR_0 \left[\xi_0\xi - \frac{1}{2} (\xi_0^2 + \xi^2) \right] \cos \theta; \end{aligned} \right.$$

$$(6.229) \left\{ \begin{aligned} T_2 &= qR_0 \left[-1 + \eta_1 + \left(1 + \frac{2\xi_0}{\lambda} \right) \eta_2 \right] \cos \theta; \\ S &= -\frac{qR_0}{2\lambda} \left[\eta_1 - \eta_2 + \left(1 + \frac{2\xi_0}{\lambda} \right) (\eta_1 + \eta_2) - 2\lambda(\xi_0 - \xi) \right] \sin \theta; \\ M_1 &= -\frac{q^2h^2}{6} \lambda^2 \left[-\eta_2 + \left(1 + \frac{2\xi_0}{\lambda} \right) \eta_1 \right] \cos \theta; \\ M_2 &= \frac{qh^2}{12} \left[-\eta_1 - \left(1 + \frac{2\xi_0}{\lambda} \right) \eta_2 + 1 + 2\xi_0\xi - \right. \\ &\quad \left. - \xi^2 - \frac{1}{6} \xi_0\xi^3 + \frac{1}{4} \xi_0^2\xi^2 + \frac{1}{24} \xi^4 \right] \cos \theta; \\ N &= \frac{qh^2}{12} \left\{ \lambda \left[(\eta_1 + \eta_2) - \left(1 + \frac{2\xi_0}{\lambda} \right) (\eta_1 - \eta_2) \right] + \right. \\ &\quad \left. + 2(\xi_0 - \xi) + \frac{1}{2} (\xi_0^2\xi - \xi_0\xi^2) + \frac{1}{6} \xi^3 \right\} \sin \theta. \end{aligned} \right.$$

Formulele (6.229) sunt aplicabile pentru calculul rezervoarelor deschise. Dacă rezervorul este prevăzut cu acoperiș (rigid în planul din dreptul zonei superioare a peretelui) atunci peste starea de eforturi și deformații, descrisă de formulele (6.229), trebuie să fie suprapusă starea de eforturi și deformații provocată de zona superioară a peretelui încastrată în acoperiș.

Pentru determinarea formulelor care să descrie această stare, trebuie să ne folosim de expresiile (6.225) și (6.223) și pornind de la condițiile de margine să determinăm c_1 și c_2 , însă pentru funcțiile η_1 și η_2 , valorile lui ξ trebuie să fie socotite, de astă dată, de la marginea superioară a peretelui.

Se presupun drept condiții de margine pentru conexiunea acoperișului cu peretele cilindric:

Cap. 6. Elemente privind calculul rezervoarelor cilindrice

$$(6.230) \quad T_{20} (\xi = \xi_0) = 0; \quad M_{10} (\xi = \xi_0) = 0$$

Condițiile (6.230) corespund legăturii articulate a zonei superioare a plăcii cilindrice a rezervorului cu placa având rigiditate absolută în planul acoperișului acestuia.

Bara de deasupra ne arată faptul că în calculul mărimii date, coordonata relativă ξ se consideră de la marginea superioară a peretelui rezervorului.

Astfel, utilizând condiția (6.230) și formula pentru T_2 și M_1 , din (6.225) se determină:

$$(6.231) \quad \bar{c}_1 = \frac{q \cdot R_0^2}{4B\lambda^4}; \quad \bar{c}_2 = \frac{q \cdot h^2 \cdot R_0^2}{48\lambda^6 D}.$$

Înlocuind (6.231) în relațiile (6.222) și (6.223), rezultă:

$$(6.232) \quad \begin{cases} \bar{u}_0 = -\frac{qR_0^2}{4B\lambda^3}(\eta_1 + \eta_2)\cos\theta; \\ \bar{v}_0 = -\frac{qR_0^2}{B\lambda^2} \cdot \eta_2 \cdot \sin\theta; \\ \bar{w}_0 = -\frac{qR_0^2}{B} \eta_1 \cdot \cos\theta; \\ \bar{T}_{10} = \frac{qR_0}{2\lambda^2} \cdot \eta_2 \cdot \cos\theta; \\ \bar{S}_0 = -\frac{qR_0}{2\lambda}(\eta_1 - \eta_2)\sin\theta; \\ \bar{T}_{20} = qR_0 \cdot \eta_1 \cdot \cos\theta; \end{cases}$$

Cap. 6. Elemente privind calculul rezervoarelor cilindrice

$$(6.232) \quad \begin{cases} \bar{M}_{10} = \frac{1}{6}q \cdot h^2 \cdot \lambda^2 \cdot \eta_2 \cdot \cos\theta; \\ \bar{M}_{20} = -\frac{qh^2}{12} \eta_1 \cdot \cos\theta; \\ \bar{N}_0 = \frac{q\lambda h^2}{12}(\eta_1 + \eta_2)\sin\theta. \end{cases}$$

Ținând seama de precizia calculelor uzuale, mărimile $\bar{u}_0$ și $\bar{v}_0$ pot fi neglijate.

6.4.7. CALCULUL REZERVOARELOR LA ACȚIUNEA TEMPERATURII

În condiții de exploatare normală pe lângă presiunea produselor păstrate și altor încărcări, rezervoarele suportă acțiunea variației de temperatură, care poate induce în elementele acestora **importante eforturi secționale**.

Astfel, de exemplu, la rezervoarele supraterane de petrol cu culori întunecate, expuse însoririi în zona golfului, în timpul iernii, în special la umplerea parțială a acestora, în primul moment se produc stări periculoase de tensiuni din temperatură (cu puncte de inițiere a unei stări de fisurare).

Forțele și momentele suplimentare acționează în zonele de îmbinare a elementelor componente ale rezervorului ca urmare a diferenței de temperatură între aceste elemente și bineînțeles, a diferențelor mărimilor deformațiilor. De aceea, conform normelor rusești (SN 326-65), structurile de rezistență ale tuturor rezervoarelor din BA trebuie calculate la acțiunea temperaturii, prin considerarea calculului elementelor rezervoarelor numai la SL de deformații, apariția și deschiderea fisurilor.

Structurile tipice rezervoarelor din BA trebuie proiectate considerând următoarele temperaturi ale produselor înmagazinate:

- petrol de la -10° la $+60^{\circ}$ C;
- produse petroliere rafinate (benzină, kerosen, uleiuri) de la -20° la $+40^{\circ}$ C;
- păcură (și produse cu caracteristici apropiate de cele ale motorinei) de la -5° la $+95^{\circ}$.

Distribuția temperaturii pe grosimea elementelor rezervorului și determinarea mărimii celei mai mari variații de temperatură se bazează pe următorii factori: aspectul produsului, temperatura maximă a acestuia pe timpul umplerii și golirii rezervorului, temperatura construcției rezervorului înainte de umplere sau golire, aspectul materialului și grosimea stratului de material presărat sau a izolației rezervorului, temperatura mediului înconjurător, coeficienții de supraîncălzire a produsului sau de subrăcire a construcției, viteza de

umplere a rezervorului cu produse calde sau reci, respectiv viteza de încălzire a produsului.

Mărimile caracteristicilor fizice ale betonului greu, necesare în calculul distribuției temperaturilor în secțiunile elementelor, ale deformațiilor și eforturilor din acțiunea temperaturii, pot fi considerate astfel:

- coeficientul de dilatare liniară prin încălzire (subrăcire) în intervalul de la -40° la $+100^{\circ}$ C, $\alpha = 1 \cdot 10^{-5}$ $1/^{\circ}$ C;
- coeficientul de conductivitate termică $\lambda = 1,4 \cdot 4,2$ kJ $(m \cdot h \cdot ^{\circ}$ C);
- coeficientul de difuzie a căldurii $a = 3 \cdot 10^{-3}$ m^2/h .

Coeficientul de restituire a căldurii de către produs (păcură, petrol și derivate) către perete sau radierul rezervorului α_B se determină în fiecare caz pe baza datelor experimentale. În absența datelor experimentale, coeficientul de restituire a căldurii pentru păcura marca 100 la temperatura de 95° C poate fi considerat egal cu $30 \cdot 4,2$ kJ/($m^2 h ^{\circ}$ C), iar pentru păcură marca 20, pentru aceeași temperatură, este egal cu $45 \cdot 4,2$ kJ/($m^2 h ^{\circ}$ C).

Pentru **viteza vântului** mai mică de 5 m/s, mărimea de calcul a coeficientului de restituire a căldurii trebuie interpolată între cele două valori extreme.

Pentru calculul elementelor rezervorului, la care temperatura poate crește până la 60° și mai mult, este necesar să considerăm reducerea rezistenței betonului ca urmare a încălzirii prin coeficientul γ_b .

Mărimea coeficientului γ_b pentru temperatura betonului de 60° C se poate considera egală cu 0,85, iar pentru temperatura de 95° C cu valoarea de 0,80.

Modulul de elasticitate a betonului la compresiune $E_{b,t}$ (în N/cm²), la temperatura de 60° și mai mare se determină cu relația:

$$E_{b,t} = E_b \cdot \beta_b$$

în care

E_b - modulul inițial de elasticitate a betonului;

Cap. 6. Elemente privind calculul rezervoarelor cilindrice

β_b - coeficient egal cu 0,90 pentru temperatura betonului de 60° și 0,80 pentru temperatura betonului egală cu 95° C.

Pentru calculul elementelor rezervorului din BP, a căror temperatură poate depăși 40° C, urmează să considerăm pierderile de tensiuni în armătura pretensionată prin suma pierderii principale și a pierderii suplimentare, condiționată de încălzirea elementelor rezervorului.

Pierdere principală de tensiune în armătura pretensionată se determină după normative, iar cea suplimentară poate fi considerată astfel: 6000 N/cm² datorită contracției betonului, 0,3 σ_2 datorită curgerii lente a acestuia, respectiv din relaxarea tensiunii în armătură, reprezentând 0,0013 ($t_a - t_0$) · σ_0 , în care:

t_a - temperatura cea mai mare de încălzire a armăturii la exploatarea rezervorului, în °C;

t_0 - temperatura armăturii la terminarea construcției;

$\Delta\sigma_{\bar{\varphi}}$ - pierdere de tensiune în armătura pretensionată din curgerea lentă a betonului, determinată după normative.

Pentru determinarea eforturilor din acțiunea temperaturii în plăcile sferice și pereții cilindrici ai rezervoarelor se presupune că **variația de temperatură** pe grosimea elementului este descrisă de o lege liniară (fig. 6.26).

De aici rezultă că și deformațiile specifice ale plăcii cilindrice vor fi distribuite pe grosimea acesteia tot după o lege liniară, legătura dintre acestea și temperaturi fiind realizată prin intermediul coeficientului de dilatare liniară a materialului α .

Se consideră o placă sferică cu grosimea h și raza de curbură R . Presupunem că temperatura suprafeței interioare este egală cu cea a mediului, respectiv t_1 . Temperatura suprafeței exterioare este $t_2 < t_1$, iar coeficientul de dilatare termică liniară este α .

Din fig. 6.26 se observă că $\frac{t_1 - t_2}{2} = \frac{\Delta t}{2}$ determină deformarea plăcii după o suprafață curbă, pentru care

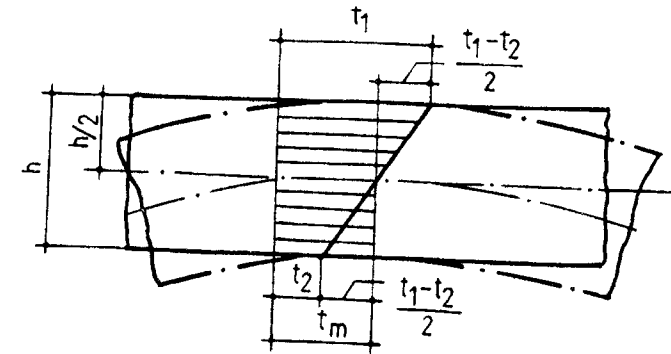


Fig. 6.26. Epura distribuției temperaturii pe grosimea peretelui cilindric.

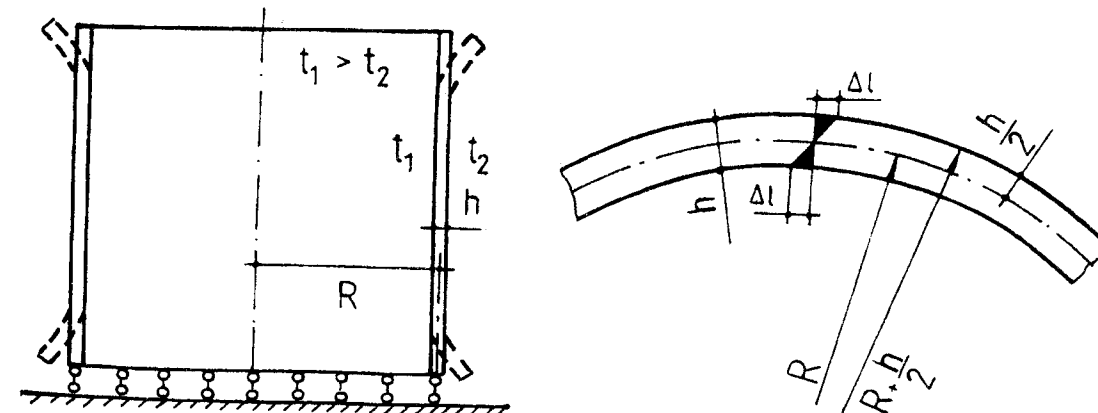


Fig. 6.27. Cu privire la determinarea eforturilor și deformațiilor plăcii cilindrice singulare la variația de temperatură.

$$(6.233) \quad \frac{1}{r} = \frac{d\theta_1}{dx} = \frac{\alpha(t_1 - t_2)}{h} = \frac{\alpha \cdot \Delta t}{h} = w'',$$

în care r - raza de curbură a suprafeței curbe meridiane;
 w'' - săgeata suprafeței curbe.

Din relația (6.233) se determină, prin integrare de ordinul I, expresia unghiului de rotire a secțiunii plăcii. Unghiul specific de rotire a zonei de placă devine:

$$(6.234) \quad \theta_1 = \alpha \frac{\Delta t}{h} \cdot R$$

Unghiul specific de rotire multiplicat cu $E_{b,t} \cdot l$ devine:

$$(6.235) \quad a_{1t} = \alpha \cdot E_{b,t} \cdot l \cdot \frac{\Delta t}{h} \cdot R$$

Mărimea medie a temperaturii $\frac{t_1 + t_2}{2}$ determină numai deformarea axială a plăcii după suprafața sa mediană.

Deplasarea sa zonală se determină după relația:

$$(6.236) \quad u_t = \alpha \cdot \frac{t_1 + t_2}{2} = \alpha \cdot t_m \cdot R$$

Prin multiplicarea acestei valori cu $E_{b,t} \cdot l$ rezultă:

$$a_{2t} = \alpha E_{b,t} \cdot l \cdot t_m \cdot R$$

Dacă marginea plăcii este simplu rezemată, adică deplasările sunt libere, atât unghiulare cât și cele liniare, deformațiile din variația de temperatură nu produc în placă eforturi secționale.

Prin legarea marginii plăcii, în aceasta se produc momente încovoietoare în direcția razei și după inele, în afara celor corespunzătoare stadiului de membrană.

Din condiția ca unghiul de rotire a marginii plăcii să fie egal cu zero, se obține expresia:

$$a_{11} \cdot M_{1t} - a_{1t} = 0$$

de unde:

$$(6.237) \quad M_{1t} = \frac{a_{1t}}{a_{11}} = \frac{\alpha E_{b,t} \cdot l \cdot \Delta t \cdot R}{h \cdot R} = \alpha \cdot E_{b,t} \cdot l \cdot \frac{\Delta t}{h}$$

unde M_{1t} este momentul încovoietor radial din acțiunea variației de temperatură.

După cum se cunoaște din calculul plăcilor curbe momentul radial de margine determină încovoierea permanentă a plăcii pe deschiderea acesteia cu valoarea :

$$(6.238) \quad M_{1t} = M_{2t} = \alpha E_{b,t} \cdot l \cdot \frac{\Delta t}{h}$$

în care M_{2t} este momentul încovoietor din acțiunea temperaturii în inelul de rezemare a plăcii.

Din condiția că marginea plăcii nu are deplasare în planul median al plăcii, adică în direcția radială, se consideră ecuația pentru determinarea forței T_{1t} din acțiunea temperaturii:

$$(6.239) \quad b_{11} \cdot T_{1t} - a_{2t} = 0$$

în care $b_{11} = \frac{Rh^2}{12}$ este multiplicat cu $E_{b,t} \cdot J$ - rigiditatea marginii plăcii la deplasarea radială sub intensitatea încărcării egală cu unitatea.

Din (6.239) rezultă:

$$(6.240) \quad T_{1t} = \frac{a_{2t}}{b_{11}} = \alpha \cdot t_m \cdot E_{b,t} \cdot h = T_{2t},$$

adică forța radială din acțiunea temperaturii este egală cu forța corespunzătoare inelului de rezemare.

În acest mod, la plăcile încastrate, în urma variației de temperatură, se produc eforturi excentrice de compresiune (sau întindere) cu excentricitate constantă în planul plăcii.

Se propune acum **analiza plăcii cilindrice singulare** cu grosime constantă h și raza suprafeței mediane R_0 . Marginea plăcii este complet liberă la deplasare (fig. 6.27).

Fie t_1 - temperatura pe suprafața interioară și t_2 pe cea exterioară, astfel încât $t_1 > t_2$; temperatura medie a plăcii, $\frac{t_1 + t_2}{2} = t_m$, determină mărirea razei sale, adică deplasarea specifică a plăcii pe direcția radială:

$$w_t = \varepsilon_t \cdot R_0 = \alpha t_m \cdot R_0,$$

respectiv multiplicată cu D_0 :

$$(6.241) \quad \alpha_{2t} = D_0 \cdot \alpha \cdot t_m \cdot R_0$$

Deoarece această deplasare nu are de învins nici un obstacol (marginile plăcii cilindrice fiind libere), nu se produc eforturi în placă.

Variația de temperatură pe grosimea peretelui, între suprafețele interioară și exterioară a peretelui, prin mărirea $\frac{t_1 - t_2}{2}$, determină un moment încovoietor inelar static nedeterminat.

Dacă pe extradadosul plăcii s-ar face o secționare/tăietură, în dreptul acestei tăieturi, secțiunea s-ar roti cu unghiul θ_t , care poate fi determinat după următoarea metodă.

Fibrele inelare exterioare (sau întinderea a celor interioare) se scurtează după relația

$$\Delta l = E_{b,t} \cdot 2\pi \left(R_0 + \frac{h}{2} \right) = \alpha_{b,t} \cdot \frac{t_1 - t_2}{2} \cdot 2\pi \left(R_0 + \frac{h}{2} \right),$$

sau, neglijând influența mărimii $h/2$ asupra pereților subțiri, în comparație cu R_0 , rezultă:

$$\Delta l = \alpha_{b,t} \cdot \frac{\Delta t}{2} \cdot 2\pi \cdot R_0.$$

Raportul dintre Δl și semigrosimea peretelui reprezintă tangenta unghiului θ_t , care pentru valori mici poate fi aproximată cu unghiul respectiv, adică:

$$\theta_t = \frac{2\Delta l}{h} \equiv \alpha_{b,t} \cdot \frac{\Delta t}{h} \cdot 2\pi R_0.$$

După cum se știe, unghiul de rotire a inelului de rezemare cu raza R_0 , în dreptul tăieturii sub $M = 1$, devine

$$\delta_{11} = \frac{1}{D_0} \cdot 2\pi R_0$$

Condiția de **continuitate** a fibrelor inelare are aspectul

$$\delta_{11} \cdot M_{2t} - \theta_t = 0, \quad \text{de unde:}$$

$$(6.242) \quad M_{2t} = \frac{\theta_t}{\delta_{11}} = \alpha_{b,t} \cdot D_0 \cdot \frac{\Delta t}{h}$$

În acest mod, pe întreaga înălțime a plăcii cilindrice vor acționa momente inelare, constante ca mărime, ca în construcțiile de sprijinire/apărare.

Cap. 6. Elemente privind calculul rezervoarelor cilindrice

Dacă temperatura suprafeței interioare a peretelui este mai mare decât temperatura celei exterioare, se va produce întinderea fibrelor inelare exterioare și comprimarea celor interioare și invers.

La determinarea mărimii M_{1t} - momentul încovoietor în placă, sub acțiunea temperaturii în sensul arătat, se presupune de la început că marginile sale au legătură rigidă la rotire, în situația în care ea a fost până la încălzire.

Deplasările radiale ale marginilor se vor produce liber. În acest caz și după direcția arătată acționează un moment constant corespunzător legăturii rigide, adică un moment egal cu cel ce acționează pe direcție inelară:

$$M_{1t}^0 = M_{2t} = \alpha_{b,t} \cdot D_0 \cdot \frac{\Delta t}{h}.$$

Pentru a trece de la placa cu încastrare pe contur la placa cu margini libere, urmează să se elimine condiția de constrângere/încastrare, scoțând momentul de încastrare M_{1t}^0 .

Pentru aceasta este necesar să aplicăm pe margini un moment egal în valoare absolută cu mărimea M_{1t}^0 , dar cu semn opus, care pentru distanțe suficient de mari între marginile plăcii, poate produce încovoierea plăcii pe direcția generatoarei după legea:

$$M_{1t}^* = M_{1t}^0 (\eta_1 + \eta_2).$$

În acest fel, datorită diferenței de temperatură între suprafețele interioară și exterioară ale plăcii cilindrice cu margini libere de - a lungul generatoarei apare un moment egal cu diferența dintre momentul constant și momentul M_{1t}^0 și momentul M_{1t}^* care variază repede pe lungimea generatoarei, având caracterul unui efect local.

Se obține:

Cap. 6. Elemente privind calculul rezervoarelor cilindrice

$$(6.243) \quad M_{1t} = M_{1t}^0 - M_{1t}^* = M_{1t}^0 \cdot [1 - (\eta_1 + \eta_2)]$$

în care η_1 și η_2 sunt funcții "trigonometrico - hiperbolice" ce descriu încovoierea plăcilor cilindrice încărcate cu eforturi secționale pe margine.

Cu D_0 - factorul de multiplicare a deplasării marginilor plăcii (coeficienți pentru deplasările elastice ale marginii) se obțin:

- unghiul de rotire,

$$(6.244) \quad a_{1t} = \alpha_{b,t} D_0 \cdot \frac{\Delta t}{h} \cdot S; S = 0,76 \sqrt{h R_0}$$

- deplasarea radială a marginii:

$$(6.245) \quad a_{2t} = \alpha_{b,t} \cdot D_0 \cdot \frac{\Delta t}{h} \cdot \frac{S^2}{2} + \alpha_{b,t} \cdot D_0 \cdot t_m \cdot R_0$$

Pe baza celor expuse se pot aplica metodele curențe ale mecanicii construcțiilor (metoda forțelor, a deplasărilor) pentru a determina eforturile secționale ce acționează rezervoarele cilindrice ca urmare a umplerii lor cu lichid fierbinte.

În cele mai multe cazuri în calculul construcțiilor la acțiunea temperaturii este util ca în locul rigidității cilindrice la încovoiere $D_0 = E I_0$ în formulele pentru M_{1t} , M_{2t} să se adopte rigiditatea la încovoiere după teoria lui Murașev.

Pentru construcțiile la care nu este permisă apariția fisurilor trebuie considerată rigiditatea corespunzătoare momentului apariției fisurilor, adică

$$(6.246) \quad B_t = E_{b,r} \cdot W_f (h - x_f)$$

în care $E_{b,r}$ este modulul de deformare a betonului la întindere;

x_f înălțimea zonei componente de beton în momentul apariției fisurilor.

La elementele de construcție, la care apariția fisurilor în exploatare este permisă, trebuie calculat W - modulul de rezistență al secțiunii cu considerarea existenței fisurilor.

6.4.8. CALCULUL INELELOR DE REZEMARE ȘI DE FUNDAȚIE

Plăcile sferice sau inelare, marginile plăcilor de rotație și altele se rigidizează cu inele. Zona inelului se întâlnește și în cazul fundațiilor castelelor de apă, rezervoarelor de gaze și altele.

În cazul construcției inelare prezintă importanță eforturile secționale din principalele componente, ca de exemplu, inelele de rezemare ale plăcilor pleoștite de rotație. În cele mai multe cazuri inelul preia câmpul de forțe simetrice.

Se consideră un inel de rază " r " în secțiune transversală orizontală, încărcat cu forțe orizontale ce acționează în dreptul centrului de greutate al secțiunii acestora (fig. 6.28.a).

Din condiția de echilibru al elementului, definit de două secțiuni radiale, prin unghiul $d\alpha = 1$, se deduce relația pentru determinarea forțelor interioare (în cazul analizat - de întindere):

$$(6.247) \quad T = H \cdot r$$

Deplasarea u a inelului pe direcția razei sale se determină cu ajutorul legii Hooke; tensiunea în secțiunea inelului:

$$\sigma = \frac{T}{F_p},$$

în care F_p este aria secțiunii inelului cu considerarea armăturii, adică **aria ideală**; de asemenea, alungirea specifică liniară a inelului circular:

$$\varepsilon = \frac{2\pi(r+u) - 2\pi r}{2\pi} = \frac{u}{r}, \quad \text{de unde:}$$

$$(6.248) \quad u = \varepsilon \cdot r = \frac{\sigma}{E_b} \cdot r = \frac{T}{E_b \cdot F_p} \cdot r = \frac{H \cdot r^2}{E_b \cdot F_p};$$

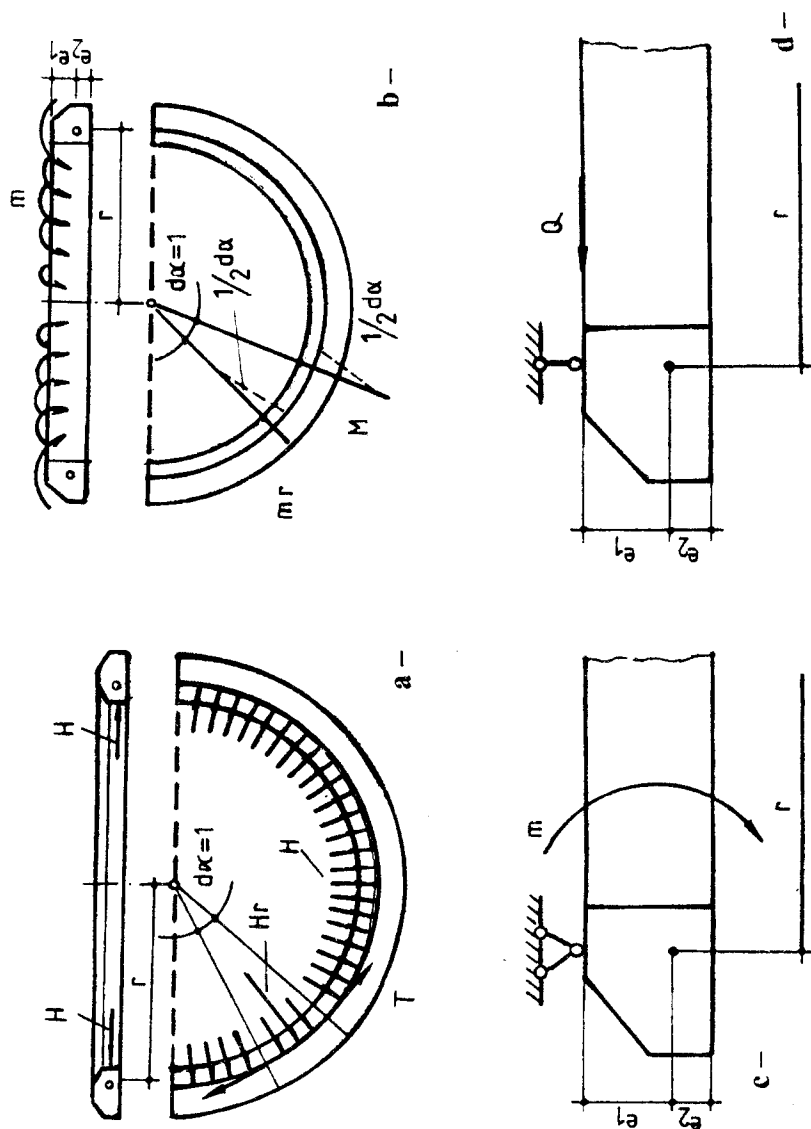


Fig. 6.28. Elemente necesare pentru stabilirea relațiilor de calcul pentru inelul de rezemare: a – la forțe radiale uniform distribuite H; b – la momente încovoietoare uniform distribuite m; c – inel cu o latură fixă; d – sistemul de bază pentru inelul cu o latură fixă.

$E_b \cdot I_p$ - reprezintă factorul de multiplicare a deplasării inelului corespunzătoare efortului $H = 1$;

$$(6.249) \quad a_{22}^{\text{inel}} = E_b \cdot I_p \cdot u = \frac{r^2 \cdot I_p}{F_p} = r^2 \cdot i^2$$

unde I_p este momentul de inerție al secțiunii inelului față de axa ce trece prin centrul ei de greutate;

$$i = \sqrt{\frac{I_p}{F_p}} \quad - \text{ raza de girație a secțiunii inelului.}$$

La încărcarea inelului cu un moment încovoietor uniform distribuit pe circumferința, m (fig. 6.28.b) pe secțiunea transversală a inelului se produc tensiuni cu diferite semne, ca la elementele încovoiate.

Într-adevăr, în acest caz, centrul de greutate al secțiunii nu se poate deplasa, secțiunea va fi numai torsionată și ca urmare fibrele inferioare, situate sub centrul de greutate se îndepărtează față de centrul inelului datorită rotirii, se alungesc, iar cele superioare se scurtează.

Momentul încovoietor ce acționează în secțiune se determină din condiția de echilibru a elementului de inel încărcat cu momentele uniform distribuite

$$(6.250) \quad M = m \cdot r$$

Folosind relația de bază a încovoierii, se poate determina unghiul de rotire a secțiunii inelului.

Tensiunea și deformația specifică devin:

$$\sigma_1 = \frac{m \cdot r}{I_p} \cdot e_1; \quad \sigma_2 = \frac{m \cdot r}{I_p} \cdot e_2;$$

$$\varepsilon_1 = \frac{m \cdot r}{E_b \cdot I_p} \cdot e_1; \quad \varepsilon_2 = \frac{m \cdot r}{E_b \cdot I_p} \cdot e_2,$$

în care I_p este momentul de inerție al secțiunii ideale de beton a inelului.

Acceptând că unghiul este egal cu tangenta sa, datorită mărimii reduse, se obține:

$$(6.251) \quad \varphi = \frac{u_1}{e_1} = \frac{u_2}{e_2} = \frac{m \cdot r^2}{E_b \cdot I_p}$$

$E_b I_p$ - factorul ce multiplică unghiul de rotire al secțiunii inelului corespunzător $m = 1$;

$$(6.252) \quad a_{11}^{\text{inel}} = E_b \cdot I_p \cdot \varphi = r^2$$

Pentru calcul prezintă interes unghiul de rotire a secțiunii inelului la acțiunea m în absența deplasării laturii sale superioare (sau inferioare) - fig. 6.28.c. Pentru rezolvarea acestei probleme se consideră sistemul de bază din fig. 6.28.d și se determină forța Q ce menține latura fixată la deplasare.

Pentru determinarea forței necunoscute Q se alcătuiește ecuația care arată că sub acțiunea simultană m și Q deplasarea laturii date este egală cu zero:

$$(r^2 \cdot e_1^2 + r^2 \cdot i^2)Q - m \cdot r^2 \cdot e_1 = 0$$

În relația precedentă, expresia din paranteză reprezintă deplasarea laturii inelului sub forța $Q = 1$, aplicată la distanța e_1 de centrul de greutate al secțiunii.

Această deplasare are două componente: deplasarea $r^2 \cdot e_1^2$ determinată de momentul $Q \cdot e_1$ și deplasarea $r^2 \cdot i^2$ datorită forței Q aplicată în centrul de greutate al secțiunii.

Prin rezolvarea ecuației se obține:

$$Q = \frac{m e_1}{e_1^2 + i^2}$$

Valoarea căutată pentru unghiul de rotire a secțiunii inelului se ia ca sumă algebrică a unghiurilor de rotire produse de momentele m și forța Q :

$$\varphi_0 = m r^2 - Q \cdot e_1 \cdot r^2 = m r^2 - \frac{m r^2 e_1^2}{i^2 + e_1^2} = m r^2 \cdot \frac{i^2}{i^2 + e_1^2}.$$

Pentru $m = 1$,

$$(6.253) \quad a_{11}^0 = \frac{r^2 i^2}{i^2 + e_1^2}$$

Pentru inelul cu secțiune dreptunghiulară cu înălțimea h :

$$(6.254) \quad a_{11}^0 = r^2 \frac{\frac{h^2}{12}}{\frac{h^2}{4} + \frac{h^2}{12}} = \frac{r^2}{4}$$

În calculul fundațiilor inelare este important să se determine deplasarea inelului în domeniul elastic. Dacă se neglijează influența forțelor de frecare dintre talpa fundației și teren asupra deplasării

Cap. 6. Elemente privind calculul rezervoarelor cilindrice

radiale a inelului sub împingerea H , acționând peste centrul de greutate al secțiunii, se vor folosi relațiile (6.248) și (6.249).

În ceea ce privește unghiul de rotire a inelului, este necesar să se ia în considerare modul de lucru al mediului de rezemare.

Se presupune că sub acțiunea momentului m rotirea inelului se produce în jurul centrului de greutate al secțiunii sale și că deformările bazei de rezemare se dezvoltă după ipoteza Winkler.

O parte x din acest moment se consumă la rotirea inelului, iar partea $(m-x)$ la rotirea bazei de rezemare.

$E_b I_p$ - multiplul unghiului de rotire a inelului sub acțiunea momentului x :

$$(6.255) \quad \theta_{\text{inel}} = r^2 \cdot x$$

Considerând că eforturile de compresiune la baza de rezemare variază după o lege liniară (fig. 6.29), devine ușoară stabilirea expresiei pentru unghiul de rotire a bazei. Astfel, de exemplu, eforturile de compresiune pe conturul interior al inelului sunt

$$\sigma_1 = \frac{(m-x)c}{J_0}, \text{ iar tasarea bazei de rezemare în acest caz devine}$$

$$y_1 = \frac{(m-x) \cdot c}{J_0 \cdot K}, \text{ în care } J_0 \text{ este momentul de inerție al elementului}$$

specific pentru suprafața de rezemare a bazei, referitor la circumferință, determinat față de centrul de greutate al acestei suprafețe; K - coeficientul de pat

Considerând că unghiul de rotire este mic, se poate scrie:

$$(6.256) \quad \theta_0 = \frac{y_1}{c} = \frac{m-x}{J_0 \cdot K}$$

Momentul necunoscut x se determină din condiția de deformare simultană a fundației și a bazei de rezemare, considerând că unghiul de rotire a inelului este egal cu unghiul de rotire a bazei de rezemare, folosind relațiile (6.255) și (6.256):

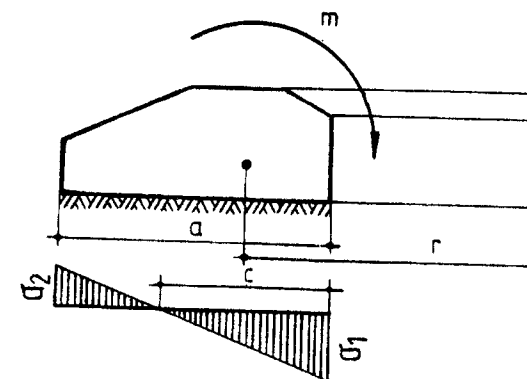


Fig. 6.29. Inel de fundație pe mediu elastic.

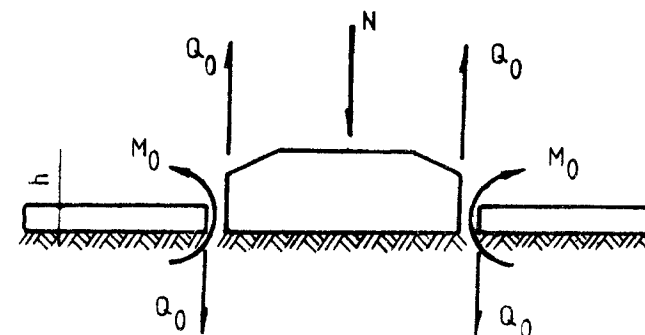


Fig. 6.30. Schema de calcul a radierului plan la încărcarea concentrată dată de forța de compresiune a stâlpului central.

$$r^2 \cdot x = E_b \cdot I_p \frac{m-x}{J_0 \cdot K},$$

de unde

$$x = \frac{E_b \cdot I_p}{I_0 \cdot K} \cdot \frac{m}{r^2 + \frac{E_b \cdot I_p}{I_0 \cdot K}}.$$

Pentru obținerea $E_b \cdot I_p$ multiplul unghiului de rotire a inelului pe mediu elastic, se înlocuiește x în ecuația (6.255) sau $(m-x)$ în (6.261), multiplicând ultima cu $E_b I_p$:

$$(6.257) \quad \theta_{11} = r^2 \frac{E_b \cdot I_p}{J_0 \cdot K} \cdot \frac{m}{r^2 + \frac{E_b \cdot I_p}{J_0 \cdot K}}$$

pentru $m = 1$,

$$(6.258) \quad a_{11}^0 = r^2 \frac{E_b \cdot I_p}{J_0 \cdot K} \cdot \frac{1}{r^2 + \frac{E_b \cdot I_p}{J_0 \cdot K}}$$

6.4.9. CALCULUL RADIERELOR PLANE ALE REZERVOARELOR

Radierile plane ale rezervoarelor circulare și rectangulare, din punctul de vedere al schemelor de calcul, reprezintă plăci pe mediu elastic încărcate, în zonele legăturii/îmbinării cu pereții, cu momente de margine și forțe tăietoare, iar în locul stâlpilor de rezemare cu încărcări locale, transmise de stâlpi pe placă.

La rezervoarele rectangulare și circulare pentru determinarea momentelor încovoietoare M_0 și a forțelor tăietoare Q_0 în zona de legătură a pereților cu radierul se poate folosi teoria grinzii pe mediu elastic considerând o fâșie de placă cu lățimea unitară.

Coeficienții deformației marginale elastice a barei pe mediu elastic, adică coeficienții ecuației canonice din metoda forțelor, pentru determinarea necunoscutele M_0 și Q_0 vor fi considerați punctuali ca cei pentru lungimea plăcii cilindrice. Astfel, $E_b I_b$ este multiplicatorul pentru grindă; unghiul de rotire pentru $M_0 = 1$, $a_{11} = S$; deplasarea

pentru $M_0 = 1$ sau unghiul de rotire pentru $Q_0 = 1$, $a_{12} = a_{21} = \frac{S^2}{2}$;

deplasarea sub forța $Q_0 = 1$, $a_{22} = \frac{S^3}{2}$.

Diferența față de plăcile cilindrice va consta în aceea că aici

$$(6.259) \quad S = \sqrt[4]{\frac{4E_b I_b}{K}},$$

în care

K este coeficientul de pat (caracteristica de rigiditate a pământului);

$E_b I_b$ - rigiditatea la încovoiere a fâșiei de placă cu lățimea egală cu unitatea.

Cap. 6. Elemente privind calculul rezervoarelor cilindrice

Pentru calculul momentelor în zonele de legătură atât pentru cele dreptunghiulare, ca și pentru rezervoarele circulare, se poate folosi relația

$$(6.260) \quad M_1 = M_0 \cdot \eta_1 + (M_0 - Q_0 \cdot S) \eta_2$$

Se consideră coordonata relativă $\varphi = \frac{x}{S}$ a cărei variație începe de la marginea plăcii.

La **placa circulară** ca urmare a încovoierii marginale apare, de asemenea, un moment încovoietor inelar M_2 pentru determinarea căruia se folosesc relațiile de calcul ale plăcilor circulare curente.

Considerând coeficientul lui Poisson $\nu = 0$, se poate scrie:

$$(6.261) \quad M_2 = \frac{\theta}{x}$$

în care θ este unghiul de rotire a plăcii multiplicat cu $E_b \cdot I_{pl}$;
 x - coordonata măsurată de la centrul plăcii.

De aici, pentru obținerea momentului inelar se impune $E_b \cdot I_p$ - multiplul unghiului de rotire a barei să se împartă la distanța dintre punctul considerat și centrul plăcii, astfel încât:

$$(6.262) \quad \begin{aligned} M_2 &= \frac{2E_b \cdot I_{pl}}{S^3 \cdot x} [M_0 \eta_4 + (M_0 - SQ_0) \eta_3] = \\ &= \frac{S \cdot K}{2x} [M_0 \eta_4 + (M_0 - SQ_0) \eta_3] \end{aligned}$$

în care $\eta_3 = \eta_1 + \eta_2$ și $\eta_4 = \eta_1 - \eta_2$.

Prin aceasta se reamintește că argumentul φ al funcțiilor η_3 și η_4 se socotește de la marginea plăcii, în care se aplică momentul M_1 .

Cap. 6. Elemente privind calculul rezervoarelor cilindrice

Semnul momentului inelar M_2 este semnul unghiului de rotire sub momentul radial, prin urmare expresia din partea dreaptă a relației trebuie interpretată ca o mărime absolută.

În ceea ce privește calculul plăcilor pe mediu elastic, acționate de încărcări locale de compresiune din stâlpi, aceasta este o problemă ceva mai complicată din punct de vedere matematic.

Cu toate acestea, se acceptă unele simplificări ca aceea că stâlpii sunt dispuși pe peretele rezervorului (și prin urmare și la marginea plăcii) la o astfel de distanță încât nu exercită influență asupra forțelor și deformațiilor în zonele de îmbinare ale pereților cu radierul.

Se poate considera, de asemenea, în mod nemijlocit, că pe placă este o presiune indusă de stâlpi care se transmite peste radierul circular și, ca urmare, în zona de încărcare a plăcii deformațiile și eforturile interioare prezintă simetrie polară.

Se scrie **ecuația¹⁶⁾ încovoierii plăcii pe mediu elastic** în coordonate polare:

$$(6.263) \quad \frac{d^4 w}{d\rho^4} + \frac{2}{\rho} \frac{d^3 w}{d\rho^3} - \frac{1}{\rho^2} \frac{d^2 w}{d\rho^2} + \frac{1}{\rho^3} \frac{dw}{d\rho} + \frac{k}{D} \cdot w = 0$$

în care: ρ - coordonata curentă, raportată, de exemplu, față de centrul radierului;
 k - coeficient de pat (mărimea reacțiunii terenului la tasarea unitară);
 D - rigiditatea la încovoiere a plăcii.

Prin rezolvarea ecuației (6.263), după formulele cunoscute din rezistența materialelor, pot fi determinate toate elementele necesare pentru calculul mărimilor statice:

- unghiul de rotire a plăcii pe direcție radială:

$$(6.264) \quad \vartheta = \frac{dw}{d\rho}$$

Cap. 6. Elemente privind calculul rezervoarelor cilindrice

- momentul radial:

$$(6.265) \quad M_1 = -D \frac{d^2 w}{d\rho^2}$$

- momentul inelar:

$$(6.266) \quad M_2 = -D \frac{1}{\rho} \cdot \frac{dw}{d\rho}$$

- forța tăietoare

$$(6.267) \quad Q = -D \left(\frac{d^3 w}{d\rho^3} + \frac{1}{\rho} \cdot \frac{d^2 w}{d\rho^2} - \frac{1}{\rho^2} \cdot \frac{dw}{d\rho} \right)$$

Revenind la ecuația (6.263), aceasta poate fi scrisă sub forma:

$$(6.268) \quad \left(\frac{d^2}{d\rho^2} + \frac{1}{\rho} \frac{d}{d\rho} \right) \left(\frac{d^2 w}{d\rho^2} + \frac{1}{\rho} \frac{dw}{d\rho} \right) + \frac{k}{D} w = 0$$

Se introduce o nouă variabilă definită prin relația:

$$(6.269) \quad \varphi = \frac{\rho}{S}, \quad \text{în care} \quad S = 4 \sqrt{\frac{D}{k}}$$

Relația (6.268), în noua variabilă, capătă următorul aspect:

$$(6.270) \quad \left(\frac{d^2}{d\varphi^2} + \frac{1}{\varphi} \frac{d}{d\varphi} \right) \left(\frac{d^2 w}{d\varphi^2} + \frac{1}{\varphi} \frac{dw}{d\varphi} \right) + w = 0$$

Cap. 6. Elemente privind calculul rezervoarelor cilindrice

Dacă se notează operatorul diferențial prin expresia simplificată $L(\) = \frac{d^2(\)}{d\varphi^2} + \frac{1}{\varphi} \frac{d(\)}{d\varphi}$ ecuația (6.270) poate fi sintetizată sub forma:

$$(6.271) \quad LL(w) + w = 0$$

Se menționează că L este operator liniar, adică

$$L(w_1 + w_2) = L(w_1) + L(w_2) \text{ și } L(\alpha w) = \alpha L(w)$$

oricare ar fi w, w_1, w_2 funcții de variabila φ și oricare ar fi α număr complex.

Ecuația (6.271) este o ecuație diferențială de ordinul 4 cu coeficienți variabili.

Pentru simplificarea modului de rezolvare a acestui tip de ecuație, Kirchoff, încă din 1879, a propus o metodă de reducere la două ecuații de ordinul doi. Într-adevăr, ecuația (6.271) poate fi scrisă astfel:

$$(6.272) \quad L[L(w) + i \cdot w] - i[L(w) + i \cdot w] = 0$$

sau

$$(6.273) \quad L[L(w) - i \cdot w] + i[L(w) - i \cdot w] = 0$$

în care $i = \sqrt{-1}$ - unitatea imaginară.

Pentru ca să se satisfacă ambele ecuații (6.272) și (6.273) trebuie ca:

$$(6.274) \quad L(w) + i \cdot w = 0$$

$$(6.275) \quad L(w) - i \cdot w = 0$$

Cap. 6. Elemente privind calculul rezervoarelor cilindrice

Ecuatiile (6.274) și (6.275) sunt ecuații de ordinul doi complex conjugate. Soluția acestora va fi de asemenea sub forma unor funcții complex conjugate.

Înseamnă că se poate rezolva numai una din aceste ecuații, iar a doua se înregistrează (nerezolvată) drept conjugata sa complexă.

În acest fel, problema se reduce la rezolvarea unei singure ecuații de ordinul doi (împreună - de ordinul patru).

Se propune analiza ecuația (6.274). În forma dezvoltată aceasta devine:

$$(6.276) \quad \frac{d^2 w}{d\varphi^2} + \frac{1}{\varphi} \frac{dw}{d\varphi} + i \cdot w = 0$$

Se introduce o nouă variabilă după formula

$$\xi = \varphi \sqrt{i} = \varphi \frac{1}{\sqrt{2}} (1+i)$$

Prin această transformare ecuația (6.276) va căpăta următorul aspect:

$$(6.277) \quad \frac{d^2 w}{d\xi^2} + \frac{1}{\xi} \cdot \frac{dw}{d\xi} + w = 0$$

Ecuația (6.277) este o ecuație diferențială ordinară de ordinul doi cu coeficienți variabili și se numește ecuația Bessel cu index nul (uneori se numește de ordinul zero).

Această ecuație nu poate fi rezolvată cu ajutorul funcțiilor elementare.

Se presupune că soluția căutată w_1 poate fi exprimată printr-o serie generalizată de tipul

Cap. 6. Elemente privind calculul rezervoarelor cilindrice

$$(6.278) \quad w_1 = \sum_{p=0}^{\infty} a_p \cdot \xi^{k+p}$$

în care k este un număr real oarecare;
 a_p – coeficienți deocamdată nedeterminați.

Derivând expresia (6.278) de două ori în raport cu ξ și înlocuind în (6.277), rezultă:

$$\sum_{p=0}^{\infty} a_p (k+p)(k+p-1) \xi^{k+p-2} + \sum_{p=0}^{\infty} a_p (k+p) \xi^{k+p-2} + \sum_{p=0}^{\infty} a_p \cdot \xi^{k+p} = 0$$

După simplificarea cu ξ^k și adunarea primelor două sume se obține ultima expresie:

$$(6.279) \quad \sum_{p=0}^{\infty} a_p (k+p)^2 \xi^{p-2} + \sum_{p=0}^{\infty} a_p \cdot \xi^p = 0$$

sau

$$(6.279.a) \quad \sum_{p=0}^{\infty} a_p (k+p)^2 \cdot \xi^p + \sum_{p=0}^{\infty} a_p \cdot \xi^{p+2} = 0$$

Folosind, mai departe, metoda coeficienților nedeterminați, adică comparând coeficienții pentru fiecare termen de același grad pentru ξ se obține următorul sistem de ecuații:

$$(6.280) \quad \begin{cases} a_0 \cdot k^2 = 0 \\ a_1 (k+1)^2 = 0 \end{cases}$$

$$(6.280) \quad \begin{cases} a_2(k+2)^2 + a_0 = 0 \\ a_3(k+3)^2 + a_1 = 0 \\ \dots \\ a_p(k+p)^2 + a_{p-2} = 0 \end{cases}$$

Considerând în prima ecuație că $a_0 \neq 0$, rezultă $k = 0$. Această ecuație se numește ecuație determinantă, de condiție.

Din ecuația a doua rezultă $a_1 = 0$, prin urmare toate valorile $a_{2p+1} = 0$.

Mai departe:

$$(6.281) \quad \begin{cases} a_2 = -\frac{a_0}{2^2}; \\ a_4 = -\frac{a_2}{4^2} = \frac{a_0}{2^2 \cdot 4^2}; \\ \dots \\ a_{2p} = \frac{(-1)^p \cdot a_0}{2^{2p} \cdot (p!)^2} \end{cases}$$

Înlocuind valorile coeficienților determinați mai sus în seria (6.278), se obține:

$$(6.282) \quad w_1 = a_0 \left(1 - \frac{\xi^2}{2^2} + \frac{\xi^4}{2^2 \cdot 4^2} - \frac{\xi^6}{2^2 \cdot 4^2 \cdot 6^2} + \dots \right),$$

sau

$$(6.283) \quad w = a_0 \sum_{p=0}^{\infty} (-1)^p \frac{\xi^{2p}}{2^{2p} (p!)^2}$$

Seria (6.283), convergentă pentru orice ξ , este soluția ecuației diferențiale (6.277) și până la o constantă de integrare reprezintă descompunerea în serie de puteri a funcției Bessel de speța întâia și ordin zero, adică:

$$(6.284) \quad J_0(\xi) = \sum_{p=0}^{\infty} (-1)^p \frac{\xi^{2p}}{2^{2p} (p!)^2}$$

Deoarece ecuația (6.277) este de ordinul doi, pentru a găsi soluția sa generală, este necesar să se mai considere o soluție particulară, liniar independentă de $J_0(\xi)$.

Această soluție se obține prin diverse procedee expuse în cursurile de ecuații diferențiale. Însă, se poate căuta direct această soluție sub forma unei sume dintre o serie de puteri generalizată și produsul unei astfel de serii cu $\ln \xi$, adică:

$$(6.285) \quad w_2 = J_0(\xi) \cdot \ln \xi + \sum_{p=0}^{\infty} b_p \cdot \xi^p$$

Coeficienții acestei serii, prin eliminarea termenului b_0 , se determină prin înlocuirea relației (6.285) în ecuația diferențială (6.277). După această operație, de asemenea, prin înmulțirea cu anumite mărimi constante (pentru reprezentarea standard a celei de-a doua soluții) se obține:

$$(6.286) \quad Y_0(\xi) = \frac{2}{\pi} \left[J_0(\xi) \left(\ln \frac{\xi}{2} + c \right) + \left(\frac{\xi}{2} \right)^2 - \frac{\left(\frac{\xi}{2} \right)^4}{2!^2} \left(1 + \frac{1}{2} \right) + \frac{\left(\frac{\xi}{2} \right)^6}{3!^2} \left(1 + \frac{1}{2} + \frac{1}{3} \right) - \dots \right]$$

Funcția $Y_0(\xi)$ reprezintă o soluție particulară a ecuației (6.277) și se numește funcția Bessel de speța a doua și ordin zero.

Constanta C se numește constanta Euler și are valoarea $C = 0,577216 \dots$

În acest mod, soluția ecuației diferențiale (6.277) va avea forma:

$$(6.287) \quad w = c_1 \cdot J_0(\xi) + c_2 \cdot Y_0(\xi)$$

Funcțiile Bessel J_0 , Y_0 de speța întâia și a doua reprezintă în esență (ca și funcțiile trigonometrice - hiperbolice) funcții oscilatoare ce se amortizează.

Valorile acestora sunt date în tabele pentru funcțiile Bessel, în literatura de specialitate, fiind folosite în calculul construcțiilor pe mediu elastic.

În aceste condiții, soluția ecuației (6.274) capătă forma:

$$(6.288) \quad w = c_1 J_0(\varphi \sqrt{i}) + c_2 \cdot Y_0(\varphi \sqrt{i})$$

Soluția ecuației complex conjugate (6.275) se scrie astfel:

$$(6.289) \quad \bar{w} = \bar{c}_1 \cdot J_0(\varphi \sqrt{-i}) + \bar{c}_2 \cdot Y_0(\varphi \sqrt{-i})$$

Dacă avem în vedere faptul că

$$(6.290) \quad \begin{cases} \sqrt{i} = \frac{1}{\sqrt{2}}(1+i) \\ \sqrt{-i} = \frac{1}{\sqrt{2}}(1-i) \end{cases}$$

atunci nu este greu să se constate că seriile de funcții J_0 și Y_0 constau din părți reale și imaginare, adică:

$$(6.291) \quad J_0(\varphi \sqrt{i}) = u_0(\varphi) + i \cdot v_0(\varphi)$$

$$(6.292) \quad Y_0(\varphi \sqrt{i}) = f_0(\varphi) + i \cdot g_0(\varphi)$$

De aceea soluția (6.288) se poate scrie astfel:

$$(6.293) \quad w = c_1 [u_0(\varphi) + i \cdot v_0(\varphi)] + c_2 [f_0(\varphi) + i \cdot g_0(\varphi)]$$

În cazul soluției complex conjugate (6.289) se poate scrie:

$$(6.294) \quad \bar{w} = \bar{c}_1 [u_0(\varphi) - i \cdot v_0(\varphi)] + \bar{c}_2 [f_0(\varphi) - i \cdot g_0(\varphi)]$$

Combinatia liniară a soluțiilor (6.293) și (6.294) definește soluția ecuației rezolvante fundamentale a problemei considerate (6.270), în forma reală:

$$(6.295) \quad w = c_1 \cdot u_0 + c_2 \cdot v_0 + c_3 \cdot f_0 + c_4 \cdot g_0$$

în care $c_1, \dots, c_4$ sunt noile constante de integrare;

$$(6.296) \quad u_0 = 1 - \frac{\left(\frac{\varphi}{2}\right)^2}{(2!)^2} + \frac{\left(\frac{\varphi}{2}\right)^8}{(4!)^2} - \frac{\left(\frac{\varphi}{2}\right)^{12}}{(6!)^2} + \dots;$$

$$(6.297) \quad -v_0 = \frac{\left(\frac{\varphi}{2}\right)^2}{(1!)^2} - \frac{\left(\frac{\varphi}{2}\right)^6}{(3!)^2} + \frac{\left(\frac{\varphi}{2}\right)^{10}}{(5!)^2} - \dots;$$

$$(6.298) \quad f_0 = \frac{u_0(\varphi)}{2} - \frac{2}{\pi} \left[R_1 + \ln \frac{\gamma \varphi}{2} \cdot v_0(\varphi) \right]$$

$$(6.299) \quad g_0 = \frac{v_0(\varphi)}{2} + \frac{2}{\pi} \left[R_2 + \ln \frac{\gamma \varphi}{2} \cdot u_0(\varphi) \right]$$

în care:

$$(6.300) \quad \left\{ \begin{aligned} R_1 &= \left(\frac{\varphi}{2}\right)^2 - \frac{\left(1 + \frac{1}{2} + \frac{1}{3}\right)}{(3!)^2} \cdot \left(\frac{\varphi}{2}\right)^6 + \frac{\left(1 + \frac{1}{2} + \dots + \frac{1}{5}\right)}{(5!)^2} \cdot \left(\frac{\varphi}{2}\right)^{10} - \\ &\quad - \frac{\left(1 + \frac{1}{2} + \dots + \frac{1}{7}\right)}{(7!)^2} \cdot \left(\frac{\varphi}{2}\right)^{14} + \dots; \\ R_2 &= \frac{\left(1 + \frac{1}{2}\right)}{(2!)^2} \cdot \left(\frac{\varphi}{2}\right)^4 - \frac{\left(1 + \frac{1}{2} + \frac{1}{3} + \frac{1}{4}\right)}{(4!)^2} \cdot \left(\frac{\varphi}{2}\right)^8 + \\ &\quad + \frac{\left(1 + \frac{1}{2} + \dots + \frac{1}{6}\right)}{(6!)^2} \cdot \left(\frac{\varphi}{2}\right)^{12} - \frac{\left(1 + \frac{1}{2} + \dots + \frac{1}{8}\right)}{(8!)^2} \cdot \left(\frac{\varphi}{2}\right)^{16} + \dots, \end{aligned} \right.$$

în care $\gamma = e^c = 1,781072 \dots$

Dacă pe placa de mari dimensiuni, rezemată pe mediu elastic, acționează încărcări locale, atunci este pe deplin evident faptul că

deformațiile și forțele interioare, care apar în placă sub aceste încărcări, se vor extinde pe o zonă nesemnificativă de placă.

De aici rezultă că, pentru evaluarea mărimilor statice de calcul necesare se impune să se opereze cu mărimi suficient de mici pentru variabila independentă φ prin care funcțiile u_0 , v_0 , f_0 și g_0 și de asemenea, primele lor derivate în raport cu φ capătă expresiile simple de forma:

$$(6.301) \quad \begin{cases} u_0 \cong 1; & v_0 = -\frac{1}{4}\varphi^2 \\ f_0 \cong \frac{1}{2} + \frac{1}{2\pi}\varphi^2 \ln \varphi; & g_0 \cong \frac{2}{\pi} \cdot \ln \varphi; \end{cases}$$

$$(6.302) \quad \begin{cases} u'_0 \cong \frac{1}{16}\varphi^3; & v'_0 = -\frac{1}{2}\varphi \\ f'_0 \cong \frac{1}{\pi}\varphi \cdot \ln \varphi; & g'_0 \cong \frac{2}{\pi} \cdot \frac{1}{\varphi}. \end{cases}$$

Semnul (') arată derivarea după φ .

După cum se observă, expresiile (6.301) și (6.302) nu sunt reprezentate prin serii infinite, ci prin ca mărimi finite.

Mai departe, se insistă asupra faptului că determinarea variabilei independente φ sub încărcări locale pe placă se va face de la centrul suprafeței încărcate a plăcii.

Pe măsura îndepărtării de acest centru, deformațiile și forțele interioare în placă trebuie să descrească repede. Doar funcțiile $u_0 \varphi$ și $v_0 \varphi$ cresc pe măsura creșterii valorii φ , odată cu îndepărtarea de locul de aplicare a încărcării și prin urmare, în ecuația săgeții plăcii (6.295) trebuie să se considere $c_1 = c_2 = 0$.

În acest mod, din punctul de vedere al temei analizate, ecuația săgeții plăcii rezemate pe mediu elastic (6.295) va căpăta forma:

$$(6.303) \quad w = c_3 \cdot f_0 + c_4 \cdot g_0$$

Primele derivate ale funcțiilor f_0 și g_0 pentru valori mici sunt prezentate în (6.302).

Derivatele de ordin superior ale acestor funcții se determină cu ajutorul ecuației diferențiale inițiale (6.274), din care, cu ajutorul expresiei din (6.293), rezultă:

$$w'' = -\left(i \cdot w + \frac{1}{\varphi} w'\right) = -\left[i(f_0 + ig_0) + \frac{1}{\varphi}(f_0' + ig_0')\right]$$

sau

$$f_0'' + ig_0'' = \left(g_0 - \frac{1}{\varphi} f_0'\right) - i \left(f_0 + \frac{1}{\varphi} g_0'\right).$$

De aici,

$$(6.304) \quad \begin{cases} f_0'' = g_0 - \frac{1}{\varphi} f_0'; \\ g_0'' = -f_0 - \frac{1}{\varphi} g_0'. \end{cases}$$

Derivând (6.304) odată, se obțin ușor derivatele de ordinul trei:

$$(6.305) \quad \begin{cases} f_0''' = g_0' - \frac{1}{\varphi} g_0 + \frac{2}{\varphi^2} f_0'; \\ g_0''' = -\left(f_0' - \frac{1}{\varphi} f_0 - \frac{2}{\varphi^2} g_0'\right). \end{cases}$$

După cum se observă din (6.304) și (6.305) derivatele de ordin superior ale funcțiilor f_0 și g_0 se exprimă prin aceste funcții ca și primele lor derivate.

Considerând relațiile (6.264) și (6.267), se obțin:

$$(6.306) \quad \begin{cases} g = \frac{dw}{d\rho} = \frac{1}{S} (c_3 \cdot f_0' + c_4 \cdot g_0') \\ M_1 = -D \cdot \frac{d^2 w}{d\rho^2} = -\frac{D}{S^2} \left[c_3 \left(g_0 - \frac{1}{\varphi} f_0' \right) - c_4 \left(f_0 + \frac{1}{\varphi} g_0' \right) \right]; \\ M_2 = -D \cdot \frac{1}{\rho} \frac{dw}{d\rho} = -\frac{D}{S^2} \left(c_3 \cdot \frac{1}{\varphi} f_0' + c_4 \cdot \frac{1}{\varphi} g_0' \right); \\ Q = -D \left(\frac{d^3 w}{d\rho^3} + \frac{1}{\rho} \cdot \frac{d^2 w}{d\rho^2} - \frac{1}{\rho^2} \cdot \frac{dw}{d\rho} \right) = -\frac{D}{S^3} (c_3 \cdot g_0' - c_4 \cdot f_0') \end{cases}$$

Se consideră că zona de încărcare a plăcii are dimensiuni mici, de exemplu ca cele corespunzătoare plăcii independente, care ar putea fi privită ca fiind subțire; mai corect această zonă ar putea fi caracterizată prin rigiditatea sa la străpungere, cu atât mai mult, în cazul dat al presiunii pe zona de radier, situată sub un stâlp, reprezentând un element suficient de rigid.

Ultimul este rațional să fie legat monolit cu radierul. În acest caz placa legată cu zona de radier de sub stâlp poate fi privită ca un radier rigid

Problema poate fi clarificată în calculul sistemului comun placă - zonă mai rigidă și încărcată local, rezemat pe mediu elastic. Această problemă se poate rezolva destul de simplu cu ajutorul metodelor curente ale mecanicii construcțiilor, de exemplu cu **metoda forțelor**, respectiv cu metode generale de analiză bazate pe tehnica elementelor finite.

Pentru aceasta, trebuie să se considere drept sistem de bază schema din fig. 6.30, iar pentru determinarea necunoscutelelor M_0 și Q_0 să se rezolve sistemul ecuațiilor canonice:

$$(6.307) \quad \begin{cases} a_{11}^p \cdot M_{10} + a_{12}^p \cdot Q_0 + \Delta_{1N} = 0 \\ a_{21}^p \cdot M_{10} + a_{22}^p \cdot Q_0 + \Delta_{2N} = 0 \end{cases}$$

Cap. 6. Elemente privind calculul rezervoarelor cilindrice

Formulele pentru coeficienții ecuațiilor canonice $a_{11}^p, a_{12}^p = a_{21}^p$ și a_{22}^p pot fi obținute prin rezolvarea problemei privind calculul plăcii de rază r , cu o deschizătură pe contur, încărcată pe acesta cu momentul încovoietor M_{10} și forța tăietoare Q_0 ; prin încărcarea conturului deschizăturii cu momentul încovoietor M_{10} , pe baza relației (6.306), se obține:

$$(6.308) \quad \begin{cases} -\frac{M_{10} \cdot S^2}{D} = c_3 \left(g_0(\lambda) - \frac{1}{\lambda} f_0'(\lambda) \right) - c_4 \left(f_0(\lambda) + \frac{1}{\lambda} g_0'(\lambda) \right); \\ 0 = c_3 \cdot g_0'(\lambda) - c_4 \cdot f_0'(\lambda). \end{cases}$$

Rezolvând sistemul (6.308), referitor la c_3 și c_4 , rezultă:

$$(6.309) \quad c_{3M} = \frac{M_{10} S^2}{D} \cdot \frac{f_0'(\lambda)}{A}; \quad c_{4M} = \frac{M_{10} \cdot S}{D} \cdot \frac{g_0'(\lambda)}{A},$$

în care

$$A = \frac{1}{\lambda} \left(f_0'^2(\lambda) + g_0'^2(\lambda) \right) + f_0(\lambda) \cdot g_0'(\lambda) - f_0'(\lambda) \cdot g_0(\lambda),$$

$\lambda = r/S$ reprezentând raza relativă a rostului (deschizăturii).

Prin încărcarea conturului deschizăturii cu forțe tăietoare se determină ¹⁷⁾ constantele de integrare, prin rezolvarea sistemului:

$$(6.310) \quad \begin{cases} c_3 \left(g_0(\lambda) - \frac{1}{\lambda} f_0'(\lambda) \right) - c_4 \left(f_0(\lambda) + \frac{1}{\lambda} g_0'(\lambda) \right) = 0; \\ c_3 \cdot g_0'(\lambda) - c_4 \cdot f_0'(\lambda) = -\frac{Q_0 S^3}{D}. \end{cases}$$

De aici rezultă:

Cap. 6. Elemente privind calculul rezervoarelor cilindrice

$$(6.311) \quad \begin{cases} c_{3Q} = -\frac{Q_0 S^3}{D} \cdot \frac{f_0(\lambda) + \frac{1}{\lambda} g_0'(\lambda)}{A}; \\ c_{4Q} = -\frac{Q_0 S^3}{D} \cdot \frac{g_0(\lambda) - \frac{1}{\lambda} f_0'(\lambda)}{A}. \end{cases}$$

Înlocuind c_{3M} și c_{4M} (din 6.309) în relațiile (6.303) și (6.306), se obțin deformațiile și forțele interioare produse de momentul încovoietor M_{10} , aplicat pe zona de rost a plăcii:

$$(6.312) \quad \begin{cases} w = \frac{M_{10} \cdot S^2}{AD} \left(f_0'(\lambda) \cdot f_0(\varphi) + g_0'(\lambda) \cdot g_0(\varphi) \right) \\ g = \frac{M_{10} \cdot S}{AD} \left(f_0'(\lambda) \cdot f_0'(\varphi) + g_0'(\lambda) \cdot g_0'(\varphi) \right) \\ M_1 = -\frac{M_{10}}{A} \left\{ f_0'(\lambda) \left[g_0(\varphi) - \frac{1}{\varphi} f_0'(\varphi) \right] - g_0'(\lambda) \left[f_0(\varphi) + \frac{1}{\varphi} g_0'(\varphi) \right] \right\}; \\ M_2 = -\frac{M_{10}}{A} \left[f_0'(\lambda) \frac{1}{\varphi} \cdot f_0'(\varphi) + g_0'(\lambda) \frac{1}{\varphi} \cdot g_0'(\varphi) \right]; \\ Q = -\frac{M_{10}}{AS} \left[f_0'(\lambda) g_0'(\varphi) - g_0'(\lambda) \cdot f_0'(\varphi) \right] \end{cases}$$

D – multiplul valorilor primele două expresii din (6.312) pentru $\varphi = \lambda$ și $M_{10} = 1$ reprezintă valorile a_{12} și respectiv a_{11} :

$$(6.313) \quad \begin{cases} a_{12}^p = S^2 \cdot \frac{f_0'(\lambda) \cdot f_0(\lambda) + g_0' \cdot g_0(\lambda)}{A}; \\ a_{11}^p = S \cdot \frac{f_0'(\lambda) + g_0'^2(\lambda)}{A}. \end{cases}$$

Înlocuind c_{3Q} și c_{4Q} și (6.311) în relațiile (6.303) și (6.306) se obțin deplasarea și forțele interioare în placă, produse de forța tăietoare Q_0 aplicată în zona deschizăturii/rostului plăcii:

(6.314)

$$\begin{cases} w = -\frac{Q_0 S^3}{AD} \left\{ \left[f_0(\lambda) + \frac{1}{\lambda} g_0'(\lambda) \right] f_0(\varphi) + \left[g_0(\lambda) - \frac{1}{\lambda} f_0'(\lambda) \right] g_0(\varphi) \right\}; \\ \vartheta = -\frac{Q_0 S^2}{AD} \left\{ \left[f_0(\lambda) + \frac{1}{\lambda} g_0'(\lambda) \right] f_0'(\varphi) + \left[g_0(\lambda) - \frac{1}{\lambda} f_0'(\lambda) \right] g_0'(\varphi) \right\}; \\ M_1 = \frac{Q_0 S}{A} \left\{ \left[f_0(\lambda) + \frac{1}{\lambda} g_0'(\lambda) \right] \left[g_0(\varphi) - \frac{1}{\varphi} f_0'(\varphi) \right] - \right. \\ \left. - \left[g_0(\lambda) - \frac{1}{\lambda} f_0'(\lambda) \right] \left[f_0(\varphi) + \frac{1}{\varphi} g_0'(\varphi) \right] \right\}; \\ M_2 = -\frac{Q_0 S}{A} \left\{ \left[f_0(\lambda) + \frac{1}{\lambda} g_0'(\lambda) \right] \frac{1}{\varphi} \cdot f_0'(\varphi) + \left[g_0(\lambda) - \frac{1}{\lambda} f_0'(\lambda) \right] \frac{1}{\varphi} \cdot g_0'(\varphi) \right\}; \\ Q = -\frac{Q_0}{A} \left\{ \left[f_0(\lambda) + \frac{1}{\lambda} g_0'(\lambda) \right] g_0'(\varphi) - \left[g_0(\lambda) - \frac{1}{\lambda} f_0'(\lambda) \right] f_0'(\varphi) \right\}. \end{cases}$$

D – multiplul valorilor primele două expresii din (6.314) pentru $\varphi = \lambda$ și $Q_0 = 1$ reprezentând respectiv valorile a_{22} și a_{21} :

$$(6.315) \quad \begin{cases} a_{22}^p = S^3 \cdot \frac{1}{A} \left\{ f_0^2(\lambda) + g_0^2(\lambda) + \frac{1}{\lambda} \left[f_0(\lambda) \cdot g_0'(\lambda) - f_0'(\lambda) \cdot g_0(\lambda) \right] \right\}; \\ a_{21}^p = S^2 \cdot \frac{1}{A} \left[f_0'(\lambda) \cdot f_0(\lambda) + g_0'(\lambda) \cdot g_0(\lambda) \right] \end{cases}$$

Deoarece $a_{12}^p = a_{21}^p$ [cum se observă din (6.313) și (6.315)], adică respectarea principiului reciprocității, se confirmă rezolvarea corectă a problemei.

Acum a mai rămas să se determine **termenii de încărcare** din ecuațiile canonice (6.307), adică Δ_{1N} , Δ_{2N} și a_{22}^{st} , în care Δ_{1N} reprezintă unghiul de rotire a plăcii, multiplicat cu D , pe linia de legătură a plăcii cu zona centrală/locală mai rigidă (în sistemul de bază), încărcată cu forța de compresiune N (nu este greu de constatat că $\Delta_{1N} = 0$); Δ_{2N} reprezintă deplasarea plăcii, multiplicată cu D , pe linia de legătură a plăcii cu zona centrală mai rigidă. Această mărime se poate determina ușor cunoscând coeficientul de pat al terenului. Rezultă:

$$(6.316) \quad \begin{cases} \Delta_{2N} = D \cdot w_{st} = -\frac{N \cdot D}{F_{st} \cdot K} = -\frac{N \cdot S^4}{F_{st}}; \\ a_{22}^{st} = \frac{2\pi \cdot r}{F_{st} \cdot r} \cdot D = \frac{2\pi S^4}{F_{st}}. \end{cases}$$

în care F_{st} - este aria zonei locale mai rigide din dreptul stâlpului.

Rezolvând sistemul (6.307) și determinând necunoscutele M_0 și Q_0 pe linia de conexiune dintre placă și zona locală mai rigidă, se pot determina, după relațiile (6.312) și (6.314), în orice punct al plăcii, mărimile w , M_1 , M_2 și Q . La plăcile subțiri, după cum s-a arătat, deformațiile și forțele interioare se amortizează repede datorită folosirii funcțiilor f_0 și g_0 și a derivatelor acestora.

ANEXA VI

Comentarii la relațiile de calcul static al rezervoarelor

În această anexă sunt prezentate dezvoltări intermediare^{*)} pentru o înțelegere mai rapidă a temei dezvoltate în capitolul 6.

1) Detalierea calculelor pentru (6.111 – 6.112):

Din $\varphi = \frac{x}{S}$ rezultă $\frac{d\varphi}{dx} = \frac{1}{S}$ și apoi succesiv:

$$\frac{dw}{dx} = \frac{dw}{d} \cdot \frac{d}{dx} = \frac{1}{S} \cdot \frac{dw}{d}, \text{ de unde se pune în evidență}$$

operatorul $\frac{d(\quad)}{dx} = \frac{1}{S} \cdot \frac{d(\quad)}{d\varphi}$; vom avea:

$$\frac{d^2w}{dx^2} = \frac{d}{dx} \left(\frac{dw}{dx} \right) = \frac{1}{S} \cdot \frac{d}{d\varphi} \left(\frac{dw}{dx} \right) = \frac{1}{S} \cdot \frac{d}{d\varphi} \left(\frac{1}{S} \cdot \frac{dw}{d\varphi} \right) = \frac{1}{S^2} \cdot \frac{d^2w}{d\varphi^2};$$

$$\frac{d^3w}{dx^3} = \frac{d}{dx} \left(\frac{d^2w}{dx^2} \right) = \frac{1}{S} \cdot \frac{d}{d\varphi} \left(\frac{1}{S^2} \cdot \frac{d^2w}{d\varphi^2} \right) = \frac{1}{S^3} \cdot \frac{d^3w}{d\varphi^3};$$

$$\frac{d^4w}{dx^4} = \frac{d}{dx} \left(\frac{d^3w}{dx^3} \right) = \frac{1}{S} \cdot \frac{d}{d\varphi} \left(\frac{1}{S^3} \cdot \frac{d^3w}{d\varphi^3} \right) = \frac{1}{S^4} \cdot \frac{d^4w}{d\varphi^4}.$$

Înlocuind în (6.110) se obține:

$$\frac{1}{S^4} \cdot \frac{d^4w}{d\varphi^4} + \frac{4}{S^4} w = -\frac{12Z}{Eh^3}, \text{ respectiv:}$$

^{*)} Aceste dezvoltări au fost efectuate de către conf. dr. Gheorghe Andricioaie de la Univ. Tehnică Iași, Catedra de matematică.

ANEXA VI

Comentarii la relațiile de calcul static al rezervoarelor

$$\frac{d^4w}{d\varphi^4} + 4w = -\frac{4R_0^2}{Eh} \quad (6.112)$$

2) Pentru **determinarea soluției generale** a ecuației omogene (6.113)

$$\frac{d^4w}{d\varphi^4} + 4w = 0, \text{ se asociază ecuația caracteristică}$$

$$r^4 + 4 = 0,$$

cu rădăcinile $r_{1,2} = -1 \pm i$, $r_{3,4} = 1 \pm i$.

Cea mai rapidă metodă de rezolvare:

$$\begin{aligned} r^4 + 4 &= r^4 + 4r^2 + 4 - 4r^2 = (r^2 + 2)^2 - (2r)^2 = \\ &= (r^2 + 2 - 2r)(r^2 + 2 + 2r) = 0. \end{aligned}$$

Rezultă patru soluții particulare ale ecuației omogene și anume:

$$\eta_1 = e^{-\varphi} \cos \varphi, \quad \eta_2 = e^{-\varphi} \sin \varphi, \quad \bar{\eta}_1 = e^{\varphi} \cos \varphi, \quad \bar{\eta}_2 = e^{\varphi} \sin \varphi,$$

iar soluția generală a ecuației omogene va fi o combinație liniară de forma:

$$w = c_1 \eta_1 + c_2 \eta_2 + c_3 \bar{\eta}_1 + c_4 \bar{\eta}_2 \quad (6.114.a)$$

unde $c_1, \dots, c_4$ sunt constante arbitrare, numite constante de integrare, iar e este numărul lui Euler (baza logaritmilor naturali).

Din considerente practice, în cazul de față, soluția se consideră sub forma:

ANEXA VI
Comentarii la relațiile de calcul static al rezervoarelor

$$w = c_1 \eta_1 + c_2 \eta_2 = c_1 e^{-\varphi} \cos \varphi + c_2 e^{-\varphi} \sin \varphi \quad (6.116)$$

3) Verificarea penultimei relații din (6.122):

$$M_1 = -\frac{2D}{S^2} (c_1 \eta_2 - c_2 \eta_1) \Big|_{c_1 = \frac{Q_0 S^3}{2D}, c_2 = 0} = -\frac{2D}{S^2} \cdot \frac{Q_0 S^3}{2D} \cdot \eta_2 = -Q_0 S \eta_2$$

4) Înlocuind $D_x = \frac{Eh_B^3(1+\beta x)^6}{12}$ **din (6.127) în ecuația omogenă**
corespunzătoare ecuației (6.109), se poate scrie:

$$\frac{d^2}{dx^2} \left(D_x \cdot \frac{d^2 w}{dx^2} \right) + \frac{Eh_x}{R_0^2} \cdot w = 0$$

sau

$$\frac{d^2}{dx^2} \left(\frac{Eh_B^3(1+\beta x)^6}{12} \cdot \frac{d^2 w}{dx^2} \right) + \frac{Eh_B(1+\beta x)^2}{R_0^2} \cdot w = 0;$$

$$\frac{Eh_B^3}{12} \cdot \frac{d}{dx} \left[6\beta(1+\beta x)^5 \cdot \frac{d^2 w}{dx^2} + (1+\beta x)^6 \frac{d^3 w}{dx^3} \right] + \frac{Eh_B(1+\beta x)^2}{R_0^2} \cdot w = 0;$$

$$\frac{h_B^2}{12} \left[30\beta^2(1+\beta x)^4 \frac{d^2 w}{dx^2} + 6\beta(1+\beta x)^5 \frac{d^3 w}{dx^3} + 6\beta(1+\beta x)^5 \frac{d^3 w}{dx^3} + \right.$$

ANEXA VI
Comentarii la relațiile de calcul static al rezervoarelor

$$\left. + (1+\beta x)^6 \frac{d^4 w}{dx^4} \right] + \frac{(1+\beta x)^2}{R_0^2} \cdot w = 0 \quad \left| \cdot \frac{12}{h_B^2(1+\beta x)^2} \right|;$$

$$(1+\beta x)^4 \frac{d^4 w}{dx^4} + 12\beta(1+\beta x)^3 \frac{d^3 w}{dx^3} + 30\beta^2(1+\beta x)^2 \frac{d^2 w}{dx^2} + \frac{12}{h_B^2 R_0^2} \cdot w = 0. \quad (6.128)$$

Această ecuație, numită ecuația Euler, devine o ecuație cu coeficienți constanți prin substituția:

$$1+\beta x = e^t \quad \text{sau} \quad t = \ln(1+\beta x), \quad (6.129)$$

după cum urmează:

$$\frac{dw}{dx} = \frac{dw}{dt} \cdot \frac{dt}{dx} = \frac{dw}{dt} \cdot \frac{\beta}{1+\beta x} = \frac{\beta}{e^t} \cdot \frac{dw}{dt} = \beta e^{-t} \frac{dw}{dt}$$

Se evidențiază operatorul de derivare:

$$\frac{d}{dx}(w) = \beta e^{-t} \frac{d}{dt}(w);$$

se determină, succesiv, derivatele:

$$\begin{aligned} \frac{d^2 w}{dx^2} &= \frac{d}{dx} \left(\frac{dw}{dx} \right) = \beta e^{-t} \frac{d}{dt} \left(\frac{dw}{dx} \right) = \beta e^{-t} \frac{d}{dt} \left(\beta e^{-t} \frac{dw}{dt} \right) = \\ &= \beta^2 e^{-2t} \left(-e^{-t} \frac{dw}{dz} + e^{-t} \frac{d^2 w}{dt^2} \right) = \beta^2 e^{-2t} \left(\frac{d^2 w}{dt^2} - \frac{dw}{dt} \right); \end{aligned}$$

ANEXA VI

Comentarii la relațiile de calcul static al rezervoarelor

$$\frac{d^3 w}{dx^3} = \frac{d}{dx} \left(\frac{d^2 w}{dx^2} \right) = \beta e^{-t} \frac{d}{dt} \left(\frac{d^2 w}{dx^2} \right) = \beta e^{-t} \frac{d}{dt} \left[\beta^2 e^{-2t} \left(\frac{d^2 w}{dt^2} - \frac{dw}{dt} \right) \right] =$$

$$= \beta^3 e^{-t} \left[-2e^{-2t} \left(\frac{d^2 w}{dt^2} - \frac{dw}{dt} \right) + e^{-2t} \left(\frac{d^3 w}{dt^3} - \frac{d^2 w}{dt^2} \right) \right] =$$

$$= \beta^3 e^{-3t} \left(\frac{d^3 w}{dt^3} - 3 \frac{d^2 w}{dt^2} + 2 \frac{dw}{dt} \right);$$

$$\frac{d^4 w}{dx^4} = \frac{d}{dx} \left(\frac{d^3 w}{dx^3} \right) = \beta e^{-t} \frac{d}{dt} \left(\frac{d^3 w}{dx^3} \right) =$$

$$= \beta e^{-t} \frac{d}{dt} \left[\beta^3 e^{-3t} \left(\frac{d^3 w}{dt^3} - 3 \frac{d^2 w}{dt^2} + 2 \frac{dw}{dt} \right) \right] =$$

$$= \beta^4 e^{-t} \left[-3e^{-3t} \left(\frac{d^3 w}{dt^3} - 3 \frac{d^2 w}{dt^2} + 2 \frac{dw}{dt} \right) + \right.$$

$$\left. + e^{-3t} \left(\frac{d^4 w}{dt^4} - 3 \frac{d^3 w}{dt^3} + 2 \frac{d^2 w}{dt^2} \right) \right] =$$

$$= \beta^4 e^{-4t} \left(\frac{d^4 w}{dt^4} - 6 \frac{d^3 w}{dt^3} + 11 \frac{d^2 w}{dt^2} - 6 \frac{dw}{dt} \right).$$

Înlocuind în (6.128), se obține:

$$e^{4t} \beta e^{-4t} \left(\frac{d^4 w}{dt^4} - 6 \frac{d^3 w}{dt^3} + 11 \frac{d^2 w}{dt^2} - 6 \frac{dw}{dt} \right) +$$

$$+ 12 \beta e^{3t} \beta^3 e^{-3t} \left(\frac{d^3 w}{dt^3} - 3 \frac{d^2 w}{dt^2} + 2 \frac{dw}{dt} \right) +$$

ANEXA VI

Comentarii la relațiile de calcul static al rezervoarelor

$$+ 30 \beta^2 e^{2t} \beta^2 e^{-2t} \left(\frac{d^2 w}{dt^2} - \frac{dw}{dt} \right) + \frac{12}{h_B^2 R_0^2} w = 0,$$

care după simplificări și reduceri de termeni conduce la ecuația:

$$\frac{d^4 w}{dt^4} + 6 \frac{d^3 w}{dt^3} + 5 \frac{d^2 w}{dt^2} - 12 \frac{dw}{dt} + \frac{12}{h_B^2 R_0^2 \beta^4} w = 0.$$

Soluția generală a acestei ecuații are forma:

$$w = c_1 e^{r_1 t} + c_2 e^{r_2 t} + c_3 e^{r_3 t} + c_4 e^{r_4 t} \quad (6.130)$$

unde c_1, c_2, c_3, c_4 sunt constantele de integrare, iar r_1, r_2, r_3, r_4 sunt rădăcinile ecuației caracteristice asociate ecuației date:

$$r^4 + 6r^3 + 5r^2 - 12r + \delta = 0, \quad (6.131)$$

$$\text{în care} \quad \delta = \frac{12}{h_B^2 R_0^2 \beta^4} \quad (6.134)$$

Observație:

La același rezultat se poate ajunge impunând ca $w = (1 + \beta x)^r$ să fie o soluție a ecuației (6.128).

În acest scop calculăm derivatele succesive,

$$\frac{dw}{dx} = r \beta (1 + \beta x)^{r-1}$$

$$\frac{d^2 w}{dx^2} = r(r-1) \beta^2 (1 + \beta x)^{r-2}$$

ANEXA VI

Comentarii la relațiile de calcul static al rezervoarelor

$$\frac{d^3 w}{dx^3} = r(r-1)(r-2)\beta^3(1+\beta x)^{r-3}$$

$$\frac{d^4 w}{dx^4} = r(r-1)(r-2)(r-3)\beta^4(1+\beta x)^{r-4},$$

care înlocuite în (6.128) conduc după simplificări la:

$$r(r-1)(r-2)(r-3)\beta^4 + 12r(r-1)(r-2)\beta^4 + 30r(r-1)\beta^4 + \frac{12}{h_B^2 R_0^2} = 0 : \beta^4$$

sau

$$r(r-1)(r-2)(r-3) + 12r(r-1)(r-2) + 30r(r-1) + \delta = 0$$

sau în final

$$r^4 + 6r^3 + 5r^2 - 12r + \delta = 0;$$

soluția generală a ecuației Euler va avea forma:

$$w = c_1(1+\beta x)^{r_1} + c_2(1+\beta x)^{r_2} + c_3(1+\beta x)^{r_3} + c_4(1+\beta x)^{r_4};$$

aceasta corespunde cazului rădăcinilor $r_1, \dots, r_4$ distincte, ceea ce este echivalent cu (6.130).

Rezolvarea ecuației caracteristice (6.131) se face folosind metoda Descartes – Euler, potrivit căreia, substituția

$$r = z - \frac{6}{4} \quad (6.132)$$

ANEXA VI

Comentarii la relațiile de calcul static al rezervoarelor

conduce la o ecuație de gradul IV incompletă (lipsește termenul cu puterea a treia). În cazul de față, această substituție face să dispară și termenul cu puterea întâia a necunoscutei, ecuația devenind bipătrată:

$$z^4 - \frac{17}{2}z^2 + \frac{225}{16} + \delta = 0 \quad (6.133)$$

5) Dacă rădăcinile ecuației caracteristice sunt reale și duble, atunci **soluția generală a ecuației în t** va fi:

$$w = c_1 e^{r_1 t} + c_2 t e^{r_1 t} + c_3 e^{r_2 t} + c_4 t e^{r_2 t}$$

ceea ce în baza substituției (6.129) devine

$$w = c_1(1+\beta x)^{r_1} + c_2(1+\beta x)^{r_1} \cdot \ln(1+\beta x) + c_3(1+\beta x)^{r_2} + c_4(1+\beta x)^{r_2} \cdot \ln(1+\beta x) \quad (6.139)$$

Explicații la (6.140) și (6.141):

Pentru $\delta > 4$ avem

$$r_1, \dots, r_4 = \pm \sqrt{4,25 \pm i\sqrt{\delta-4}} - \frac{6}{4} = \pm(p \pm iq)$$

Se pune expresia $\sqrt{4,25 \pm i\sqrt{\delta-4}}$ sub formă algebrică,

$$\text{adică } \sqrt{4,25 \pm i\sqrt{\delta-4}} = n \pm iv; \quad 4,25 \pm i\sqrt{\delta-4} = n^2 - v^2 \pm i2nv;$$

$$\text{de unde rezultă } \begin{cases} n^2 - v^2 = 4,25 \\ 2nv = \sqrt{\delta-4} \end{cases}, \quad (n, v - \text{reali}),$$

pentru care o soluție reală este

ANEXA VI

Comentarii la relațiile de calcul static al rezervoarelor

$$n = \sqrt{\frac{1}{2}(\sqrt{14,0625 + \delta} + 4,25)}, \quad v = \sqrt{\frac{1}{2}(\sqrt{14,0625 + \delta} - 4,25)},$$

pentru p și q rezultând valorile din (6.141).

6) Evaluarea mărimii Q din ultima formulă din (6.145):

$$\begin{aligned} Q = \frac{dM_1}{dx} &= \frac{d}{dx} \left(-\frac{Eh_x^3}{12} \right) \beta^2 \left[c_1 r_1 (r_1 - 1)(1 + \beta x)^{r_1 - 2} + c_2 r_2 (r_2 - 1)(1 + \beta x)^{r_2 - 2} + \right. \\ &+ c_3 r_3 (r_3 - 1)(1 + \beta x)^{r_3 - 2} + c_4 r_4 (r_4 - 1)(1 + \beta x)^{r_4 - 2} \Big] = \\ &= \frac{Eh_x^3}{12} \beta^3 \left[c_1 r_1 (r_1 - 1)(r_1 - 2)(1 + \beta x)^{r_1 - 3} + c_2 r_2 (r_2 - 1)(r_2 - 2)(1 + \beta x)^{r_2 - 3} + \right. \\ &+ c_3 r_3 (r_3 - 1)(r_3 - 2)(1 + \beta x)^{r_3 - 3} + c_4 r_4 (r_4 - 1)(r_4 - 2)(1 + \beta x)^{r_4 - 3} \Big]. \end{aligned}$$

Deoarece

$$\begin{aligned} \frac{d}{dx} \left(-\frac{Eh_x^3}{12} \right) &= -\frac{E}{12} \cdot 3h_x^2 \cdot \frac{dh_x}{dx} = -\frac{3Eh_x^2}{12} \cdot \frac{d}{dx} [h_B(1 + \beta x)^2] = \\ &= -\frac{6\beta Eh_x^2}{12} h_B(1 + \beta x) = -\frac{6\beta Eh_x^2}{12} \cdot \frac{h_B(1 + \beta x)^2}{1 + \beta x} = -\frac{Eh_x^3}{12} \cdot \frac{6\beta}{1 + \beta x}, \end{aligned}$$

rezultă:

$$\begin{aligned} Q &= -\frac{Eh_x^3}{12} \beta^3 \left[6c_1 r_1 (r_1 - 1)(1 + \beta x)^{r_1 - 3} + \right. \\ &+ 6c_2 r_2 (r_2 - 1)(1 + \beta x)^{r_2 - 3} + \dots \Big] = \\ &= \frac{Eh_x^3}{12} \beta^3 \left[c_1 r_1 (r_1 - 1)(r_1 - 2)(1 + \beta x)^{r_1 - 3} + \right. \end{aligned}$$

ANEXA VI

Comentarii la relațiile de calcul static al rezervoarelor

$$\begin{aligned} &+ c_2 r_2 (r_2 - 1)(r_2 - 2)(1 + \beta x)^{r_2 - 3} + \dots \Big] = \\ &= -\frac{Eh_x^3}{12} \beta^3 \left\{ c_1 r_1 (r_1 - 1)[r_1 - 2 + 6](1 + \beta x)^{r_1 - 3} + \right. \\ &+ c_2 r_2 (r_2 - 1)[r_2 - 2 + 6](1 + \beta x)^{r_2 - 3} + \dots \Big\} = \\ &= -\frac{Eh_x^3}{12} \beta^3 \left[c_1 r_1 (r_1 - 1)(r_1 + 4)(1 + \beta x)^{r_1 - 3} + \right. \\ &+ c_2 r_2 (r_2 - 1)(r_2 + 4)(1 + \beta x)^{r_2 - 3} + \\ &+ c_3 r_3 (r_3 - 1)(r_3 + 4)(1 + \beta x)^{r_3 - 3} + \\ &+ c_4 r_4 (r_4 - 1)(r_4 + 4)(1 + \beta x)^{r_4 - 3} \Big]. \end{aligned}$$

7) Verificarea relației (6.158):

Înlocuind $\alpha = \alpha_K + \frac{\varphi}{\lambda}(\alpha_H - \alpha_K)$ în $dp = -\frac{\alpha p S^4}{8D}(\eta_1 + \eta_2)d\varphi$ (6.157), rezultă:

$$\frac{dp}{p} = -\frac{\alpha S^4}{8D}(\eta_1 + \eta_2)d\varphi = -\left[\frac{\alpha_K S^4}{8D} + \frac{(\alpha_H - \alpha_K)S^4}{8\lambda D} \cdot \varphi \right](\eta_1 + \eta_2)d\varphi;$$

în final:

$$\frac{dp}{p} = -(\beta_K + \beta \cdot \varphi)(\eta_1 + \eta_2)d\varphi \quad (6.158)$$

8) Integrarea ecuației $\frac{dp}{p} = -(\beta_K + \beta \cdot \varphi)(\eta_1 + \eta_2)d\varphi$ (6.158)

se efectuează astfel:

ANEXA VI

Comentarii la relațiile de calcul static al rezervoarelor

- având în vedere că $\eta_1 = e^{-\varphi} \cos \varphi$ și $\eta_2 = e^{-\varphi} \sin \varphi$, ecuația anterioară devine:

$$\frac{dp}{p} = \left[-\beta_K e^{-\varphi} (\cos \varphi + \sin \varphi) - \beta \varphi e^{-\varphi} (\cos \varphi + \sin \varphi) \right] d\varphi;$$

$$\ln p = -\beta_K \underbrace{\int e^{-\varphi} (\cos \varphi + \sin \varphi) d\varphi}_I - \beta \underbrace{\int \varphi e^{-\varphi} (\cos \varphi + \sin \varphi) d\varphi}_J + \ln c;$$

$$\begin{aligned} I &= \int e^{-\varphi} (\cos \varphi + \sin \varphi) d\varphi = \int (-e^{-\varphi})' (\cos \varphi + \sin \varphi) d\varphi = \\ &= -e^{-\varphi} (\cos \varphi + \sin \varphi) - \int (-e^{-\varphi}) (-\sin \varphi + \cos \varphi) d\varphi = \\ &= -e^{-\varphi} (\cos \varphi + \sin \varphi) + \int e^{-\varphi} (-\sin \varphi + \cos \varphi) d\varphi = \\ &= -e^{-\varphi} (\cos \varphi + \sin \varphi) + \int (-e^{-\varphi})' (-\sin \varphi + \cos \varphi) d\varphi = \\ &= -e^{-\varphi} (\cos \varphi + \sin \varphi) - e^{-\varphi} (-\sin \varphi + \cos \varphi) - \\ &\quad - \int (-e^{-\varphi}) (-\cos \varphi + \sin \varphi) d\varphi = \\ &= -e^{-\varphi} (2 \cos \varphi) - I, \text{ de unde rezultă } 2I = -e^{-\varphi} \cdot 2 \cos \varphi, \text{ respectiv} \\ I &= -e^{-\varphi} \cos \varphi. \end{aligned}$$

Verificare: $I' = (-e^{-\varphi} \cos \varphi)' = e^{-\varphi} \cos \varphi + e^{-\varphi} \sin \varphi =$
 $= e^{-\varphi} (\cos \varphi + \sin \varphi);$

în continuare:

$$\begin{aligned} J &= \int \varphi e^{-\varphi} (\cos \varphi + \sin \varphi) d\varphi = \int \varphi (-e^{-\varphi} \cos \varphi)' d\varphi = \\ &= -\varphi \cdot e^{-\varphi} \cos \varphi + \underbrace{\int e^{-\varphi} \cos \varphi d\varphi}_K \end{aligned}$$

ANEXA VI

Comentarii la relațiile de calcul static al rezervoarelor

$$\begin{aligned} K &= \int e^{-\varphi} \cos \varphi d\varphi = \int (-e^{-\varphi})' \cos \varphi d\varphi = \\ &= -e^{-\varphi} \cos \varphi - \int (-e^{-\varphi}) (-\sin \varphi) d\varphi = \\ &= -e^{-\varphi} \cos \varphi - \int e^{-\varphi} \sin \varphi d\varphi = -e^{-\varphi} \cos \varphi - \int (-e^{-\varphi})' \sin \varphi = \\ &= -e^{-\varphi} \cos \varphi - (-e^{-\varphi}) \sin \varphi + \int (-e^{-\varphi}) \cos \varphi d\varphi = \\ &= -e^{-\varphi} (\cos \varphi - \sin \varphi) - K, \text{ de unde} \end{aligned}$$

$$2K = e^{-\varphi} (\sin \varphi - \cos \varphi), \quad K = \frac{1}{2} e^{-\varphi} (\sin \varphi - \cos \varphi),$$

astfel că

$$J = -\varphi e^{-\varphi} \cos \varphi + \frac{1}{2} e^{-\varphi} (\sin \varphi - \cos \varphi) \text{ și deci:}$$

$$\ln p = \beta_K e^{-\varphi} \cos \varphi - \beta \left[-\varphi e^{-\varphi} \cos \varphi + \frac{1}{2} e^{-\varphi} (\sin \varphi - \cos \varphi) \right] + \ln c;$$

$$\ln p = \beta_K e^{-\varphi} \cos \varphi + \beta \left[\varphi e^{-\varphi} \cos \varphi - \frac{1}{2} e^{-\varphi} (\sin \varphi - \cos \varphi) \right] + \ln c;$$

$$\ln p = \beta_K \cdot \eta_1 + \beta \left[\varphi \eta_1 - \frac{1}{2} (\eta_2 - \eta_1) \right] + \ln c;$$

$$\ln p = \beta_K \cdot \eta_1 + \frac{1}{2} \beta [2\varphi \eta_1 - \eta_2 + \eta_1] + \ln c;$$

$$\ln p = \beta_K \cdot \eta_1 + \frac{1}{2} \beta [(2\varphi + 1)\eta_1 - \eta_2] + \ln c.$$

Exponențiind, se obține:

ANEXA VI
Comentarii la relațiile de calcul static al rezervoarelor

$p = c \cdot e^{\beta_k \eta_1 + \frac{1}{2} \beta [(2\varphi+1)\eta_1 - \eta_2]}$, în care c este o constantă de integrare.

Observație: relația (6.159) se scrie corect sub forma:

$$p = c \cdot e^{\beta_k \eta_1 + \frac{1}{2} \beta [(2\varphi+1)\eta_1 - \eta_2]} \quad (6.159)$$

sau pentru a evita confundarea factorului cu exponentul se poate scrie sub forma:

$$p = c \cdot \exp \left\{ \beta_k \eta_1 + \frac{1}{2} \beta [(2\varphi+1)\eta_1 - \eta_2] \right\} \quad (6.159.a)$$

Astfel luând $p|_{\varphi=0} = p_k$, din (6.159) rezultă

$$p_k = c \cdot e^{\beta_k + \frac{1}{2} \beta} \text{ de unde } C = p_k \cdot e^{-\frac{1}{2} \beta - \beta_k} \quad (6.160)$$

Înlocuind (6.160) în (6.159) se obține:

$$p = p_k e^{-\frac{1}{2} \beta - \beta_k} \cdot e^{\beta_k \eta_1 + \frac{1}{2} \beta [(2\varphi+1)\eta_1 - \eta_2]} \text{ adică, în final,}$$

$$p = p_k \cdot e^{-\beta_k (1-\eta_1) - \frac{1}{2} \beta [1 - (2\varphi+1)\eta_1 + \eta_2]} \quad (6.161)$$

De asemenea, relația (6.163) se va scrie

$$p = p_k e^{-\frac{1}{2} \beta - \beta_k} \quad (6.160)$$

ANEXA VI
Comentarii la relațiile de calcul static al rezervoarelor

rezultând din (6.161) pentru $\eta_1 = \eta_2 = 0$.

Pentru $\Delta_{2p_H} = -\frac{1}{4} p_k S^4 \cdot e^{-\frac{1}{2} \beta - \beta_k}$ rezultă:

$$\left. \begin{aligned} M_H &= 0 \\ Q_H &= \frac{1}{4} p_k S e^{-\frac{1}{2} \beta - \beta_k} \\ \left(\text{sau } Q_H &= \frac{1}{4} p_k S \cdot e^{-\beta_k} \right) \end{aligned} \right\} \quad (6.166)$$

Justificare:

Se derivează $w_p = \frac{p \cdot R_0^2}{Eh}$ după regula $\frac{dw}{dx} = \frac{1}{S} \frac{dw}{d\varphi}$ și se

obține:

$$\begin{aligned} \frac{dw_p}{dx} &= \frac{1}{S} \cdot \frac{dw_p}{d\varphi} = \frac{1}{S} \cdot \frac{R_0^2}{Eh} \cdot \frac{dp}{d\varphi} = \frac{1}{S} \cdot \frac{R_0^2}{Eh} p_k \left[\beta_k \frac{d\eta_1}{d\varphi} + \right. \\ &+ \frac{1}{2} \beta \left(2\eta_1 + (2\varphi+1) \frac{d\eta_1}{d\varphi} \right) - \frac{1}{2} \beta \cdot \frac{d\eta_2}{d\varphi} \left. \right] \cdot e^{-\beta_k (1-\eta_1) - \frac{1}{2} \beta [1 - (2\varphi+1)\eta_1 + \eta_2]} = \\ &= \frac{1}{S} \cdot \frac{R_0^2}{Eh} p_k \left[\beta_k (-\eta_1 - \eta_2) + \beta \eta_1 + \beta \varphi (-\eta_1 - \eta_2) + \right. \\ &+ \frac{1}{2} \beta (-\eta_1 - \eta_2) - \frac{1}{2} \beta (\eta_1 - \eta_2) \left. \right] \cdot e^{-\beta_k (1-\eta_1) - \frac{1}{2} \beta [1 - (2\varphi+1)\eta_1 + \eta_2]} = \\ &= \frac{p_k R_0^2}{EhS} [-\beta \varphi - \beta_k] (\eta_1 + \eta_2) \cdot e^{-\beta_k (1-\eta_1) - \frac{1}{2} \beta [1 - (2\varphi+1)\eta_1 + \eta_2]} \end{aligned}$$

ANEXA VI

Comentarii la relațiile de calcul static al rezervoarelor

relația analizată are forma:

$$\frac{dw_p}{dx} = -\frac{p_K R_0^2}{EhS} (\beta_\varphi + \beta_K) (\eta_1 + \eta_2) e^{-\beta_K(1-\eta_1) - \frac{1}{2}\beta[1-(2\varphi+1)\eta_1+\eta_2]}$$

Se consideră că D – multiplul valorii $\frac{dw_p}{dx}$ pentru $\varphi = 0$ este

$$\Delta_{1pk}, \text{ adică } \Delta_{1pk} = -\frac{p_K S^3}{4} \beta_K \quad (6.168)$$

Justificare:

$$\begin{aligned} D \cdot \frac{dw_p}{dx} \Big|_{\varphi=0} &= -D \frac{p_K R_0^2}{EhS} \cdot \beta_K \cdot e^0 = -\frac{Eh^3}{12} \cdot \frac{p_K R_0^2}{EhS} \beta_K = -p_K \frac{h^2 R_0^2}{12S} \beta_K = \\ &= -p_K \frac{S^4}{4} \cdot \frac{1}{S} \beta_K = -\frac{p_K S^3}{4} \beta_K \end{aligned} \quad (6.168)$$

9) În (6.172), expresiile pentru S_1 și S_2 , trebuie să satisfacă ecuația a 6 – a din (6.170), adică:

$$S_1 + S_2 - \frac{N_2}{R_0} = 0;$$

$$B \left(\frac{\omega}{2} + \frac{h^2}{12} \cdot \frac{\tau}{R_0} \right) - B \frac{\omega}{2} - \frac{N_2}{R_0} = 0;$$

$$B \frac{h^2}{12} \cdot \frac{\tau}{R_0} - \frac{N_2}{R_0} = 0;$$

$$Eh \cdot \frac{h^2}{12} \cdot \frac{\tau}{R_0} - \frac{N_2}{R_0} = 0 \Rightarrow \frac{D \cdot \tau}{R_0} - \frac{N_2}{R_0} = 0; \quad \frac{N_2}{R_0} - \frac{N_2}{R_0} = 0;$$

ANEXA VI

Comentarii la relațiile de calcul static al rezervoarelor

pentru a fi satisfăcută relația $S_1 + S_2 - \frac{N_2}{R_0} = 0$ trebuie luat semnul

“minus” pentru ultimul termen.

Ca urmare, ecuațiile (6.174) vor fi satisfăcute integral, ultima ecuație devenind:

$$\frac{\partial v}{\partial \theta} + w + a^2 \nabla^4 w + a^2 \left(\frac{\partial^3 v}{\partial \theta^3} - 2 \frac{\partial^4 w}{\partial \xi^2 \partial \theta^2} \right) - \frac{R_0^2 Z}{B} = 0.$$

10) În vederea stabilirea relației (6.188), derivăm prima din (6.176) în raport cu ξ și scădem a doua din aceeași relație derivată în raport cu θ :

$$\begin{aligned} &\frac{\partial}{\partial \xi} \left(\frac{\partial^2 u}{\partial \xi^2} + \frac{1}{2} \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial \theta^2} + \frac{1}{2} \cdot \frac{\partial^2 v}{\partial \xi \partial \theta} + \frac{R_0^2 X}{B} \right) - \\ &- \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\frac{1}{2} \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial \xi \partial \theta} + \frac{1}{2} \cdot \frac{\partial^2 v}{\partial \xi^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial \theta^2} - \frac{\partial w}{\partial \theta} + \frac{R_0^2 Y}{B} \right) = 0; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &\frac{\partial^3 u}{\partial \xi^3} + \frac{1}{2} \cdot \frac{\partial^3 u}{\partial \theta^2 \partial \xi} + \frac{1}{2} \cdot \frac{\partial^3 v}{\partial \xi^2 \partial \theta} - \frac{1}{2} \cdot \frac{\partial^3 u}{\partial \xi \partial \theta^2} - \frac{1}{2} \cdot \frac{\partial^3 v}{\partial \xi^2 \partial \theta} - \\ &- \frac{\partial^3 v}{\partial \theta^3} + \frac{\partial^2 w}{\partial \theta^2} = 0. \end{aligned}$$

$$\text{Se obține ecuația: } \frac{\partial^3 u_b}{\partial \xi^3} - \frac{\partial^3 v_b}{\partial \theta^3} + \frac{\partial^2 w_b}{\partial \theta^2} = 0 \quad (6.188)$$

Derivând de două ori a treia ecuație din (6.176) în raport cu θ și scăzând rezultatul din (6.188) rezultă:

ANEXA VI

Comentarii la relațiile de calcul static al rezervoarelor

$$\frac{\partial^3 u_b}{\partial \xi^3} - \frac{\partial^3 v_b}{\partial \theta^3} + \frac{\partial^2 w_b}{\partial \theta^2} - \frac{\partial^2}{\partial \theta^2} \left(-\frac{\partial v_b}{\partial \theta} + w_b - \frac{R_0^2 Z}{B} \right) = 0;$$

$$\frac{\partial^3 u_b}{\partial \xi^3} - \frac{\partial^3 v_b}{\partial \theta^3} + \frac{\partial^2 w_b}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^3 v_b}{\partial \theta^3} - \frac{\partial^2 w_b}{\partial \theta^2} + \frac{R_0^2}{B} \cdot \frac{\partial^2 Z}{\partial \theta^2} = 0,$$

adică
$$\frac{\partial^3 u_b}{\partial \xi^3} + \frac{R_0^2}{B} \cdot \frac{\partial^2 Z}{\partial \theta^2} = 0 \quad (6.189)$$

11) Referitor la relația (6.201), în condiția $T_1(\xi_0) = 0$, prima ecuație din (6.194) devine:

$$0 = -R_0 \cdot \frac{\partial^2 Z}{\partial \theta^2} \cdot \frac{\xi_0^2}{2} + \frac{B}{R_0} f_1(\theta) \cdot \xi_0 + \frac{B}{R_0} f_2(\theta).$$

Înlocuind aici pe $f_1(\theta) = \frac{R_0^2}{B} \cdot \xi_0 \cdot \frac{\partial^2 Z}{\partial \theta^2}$ din (6.199) se obțin:

$$\frac{B}{R_0} f_2(\theta) = R_0 \cdot \frac{\partial^2 Z}{\partial \theta^2} \cdot \frac{\xi_0^2}{2} - \frac{B}{R_0} \xi_0 \cdot \frac{R_0^2}{B} \cdot \xi_0 \cdot \frac{\partial^2 Z}{\partial \theta^2} \Big| \cdot \frac{R_0}{B};$$

$$f_2(\theta) = \frac{R_0^2}{B} \cdot \xi_0^2 \cdot \frac{\partial^2 Z}{\partial \theta^2} \left(\frac{1}{2} - 1 \right), \text{ adică:}$$

$$f_2(\theta) = -\frac{R_0^2}{B} \cdot \frac{\xi_0^2}{2} \cdot \frac{\partial^2 Z}{\partial \theta^2} \quad (6.201)$$

12) Referitor la calculul mărimii T_{20} din (6.207):

ANEXA VI

Comentarii la relațiile de calcul static al rezervoarelor

$$\begin{aligned} T_2 = B \varepsilon_2 &= \frac{B}{R_0} \left(\frac{\partial v}{\partial \theta} - w \right) = \frac{B}{R_0} \left(\frac{\partial^4 \phi}{\partial \theta^4} + 2 \cdot \frac{\partial^4 \phi}{\partial \xi^2 \partial \theta^2} - \nabla^4 \phi \right) = \\ &= \frac{B}{R_0} \left(\frac{\partial^4 \phi}{\partial \theta^4} + 2 \cdot \frac{\partial^4 \phi}{\partial \xi^2 \partial \theta^2} - \frac{\partial^4 \phi}{\partial \xi^4} - 2 \cdot \frac{\partial^4 \phi}{\partial \xi^2 \partial \theta^2} - \frac{\partial^4 \phi}{\partial \theta^4} \right) = \\ &= -\frac{B}{R_0} \cdot \frac{\partial^4 \phi}{\partial \xi^4}. \end{aligned}$$

13) Verificarea ultimei relații din (6.221):

$$\begin{aligned} N_0 &= -\frac{D}{R_0^2} \cdot \frac{\partial^2}{\partial \xi \partial \theta} \cdot \nabla^4 \phi = -\frac{D}{R_0^2} \cdot \frac{\partial^2}{\partial \xi \partial \theta} \left(\frac{\partial^4 \phi}{\partial \xi^4} + 2 \frac{\partial^2 \phi}{\partial \xi^2 \partial \theta^2} + \frac{\partial^4 \phi}{\partial \theta^4} \right) = \\ &= -\frac{D}{R_0^2} \cdot \frac{\partial^2}{\partial \xi \partial \theta} \left[(c_1 \eta_1^{IV} + c_2 \eta_2^{IV}) \cos \theta - 2(c_1 \eta_1^{II} + c_2 \eta_2^{II}) \cos \theta + \right. \\ &\quad \left. + (c_1 \eta_1 + c_2 \eta_2) \cos \theta \right] = +\frac{D}{R_0^2} \cdot \frac{\partial}{\partial \xi} \left[-c_1 \cdot 4\lambda^4 \eta_1 - c_2 \cdot 4\lambda^4 \eta_2 - \right. \\ &\quad \left. - 2c_1 \cdot 2\lambda^2 \eta_2 + 2c_2 \cdot 2\lambda^2 \eta_1 + c_1 \eta_1 + c_2 \eta_2 \right] \sin \theta = \\ &= \frac{D}{R_0^2} \left[-c_1 4\lambda^4 \eta_1' - c_2 \cdot 4\lambda^4 \eta_2' - 2c_1 2\lambda^2 \eta_2' + 2c_2 2\lambda^2 \eta_1' + c_1 \eta_1' + \right. \\ &\quad \left. + c_2 \eta_2' \right] \sin \theta = \frac{D}{R_0^2} \left[+4c_1 \lambda^4 \cdot \lambda(\eta_1 + \eta_2) - 4c_2 \lambda^4 \cdot \lambda(\eta_1 - \eta_2) - \right. \\ &\quad \left. - 4c_1 \lambda^2 \cdot \lambda(\eta_1 - \eta_2) - 4c_2 \lambda^2 \cdot \lambda(\eta_1 + \eta_2) - c_1 \lambda(\eta_1 + \eta_2) + \right. \\ &\quad \left. + c_2 \lambda(\eta_1 - \eta_2) \right] \sin \theta = \lambda \frac{D}{R_0^2} \left\{ c_1 [(1 - 4\lambda^4)(-\eta_1 - \eta_2) - 4\lambda^2(\eta_1 - \eta_2)] + \right. \\ &\quad \left. + c_2 [(1 - 4\lambda^4)(\eta_1 - \eta_2) - 4\lambda^2(\eta_1 + \eta_2)] \right\} \sin \theta. \end{aligned}$$

ANEXA VI

Comentarii la relațiile de calcul static al rezervoarelor

14) Justificarea relației a 2-a din (6.225):

$$v = v_0 + v_b = 4\lambda^2(-c_1\eta_2 + c_2\eta_1)\sin\theta -$$

$$-\frac{R_0^2}{B}\left[\frac{\partial Z}{\partial\theta}(2\xi_0\xi - \xi^2) + \frac{\partial^3 Z}{\partial\theta^3}\left(\frac{1}{6}\xi_0\xi^3 - \frac{1}{4}\xi_0^2\xi^2 - \frac{1}{24}\xi^4\right)\right]$$

$$\text{Deoarece } Z = q \cos \theta, \frac{\partial Z}{\partial\theta} = -q \sin \theta \quad \text{și} \quad \frac{\partial^3 Z}{\partial\theta^3} = q \sin \theta$$

rezultă:

$$v = 4\lambda^2(-c_1\eta_2 + c_2\eta_1)\sin\theta - \frac{R_0^2}{B}q\left[-2\xi_0\xi + \xi^2 + \frac{1}{6}\xi_0\xi^3 - \frac{1}{4}\xi_0^2\xi^2 - \frac{1}{24}\xi^4\right]\sin\theta =$$

$$= \left[4\lambda^2(-c_1\eta_2 + c_2\eta_1) + q\frac{R_0^2}{B}\left(2\xi_0\xi - \xi^2 - \frac{1}{6}\xi_0\xi^3 + \frac{1}{4}\xi_0^2\xi^2 + \frac{1}{24}\xi^4\right)\right]\sin\theta.$$

15) Deducerea penultimei relații din (6.225):

$$M_2 = -\frac{D}{R_0^2} \cdot \frac{\partial^2 w}{\partial\theta^2} = -\frac{D}{R_0^2} \cdot \frac{\partial^2}{\partial\theta^2} \left\{ \left[4\lambda^4(-c_1\eta_1 - c_2\eta_2) + \frac{qR_0^2}{B} \cdot \left(1 + 2\xi_0\xi - \xi^2 - \frac{1}{6}\xi_0\xi^3 + \frac{1}{4}\xi_0^2\xi^2 + \frac{1}{24}\xi^4 \right) \right] \cos\theta \right\} =$$

ANEXA VI

Comentarii la relațiile de calcul static al rezervoarelor

$$= \frac{D}{R_0^2} \left\{ 4\lambda^4(-c_1\eta_1 - c_2\eta_2) + \frac{qR_0^2}{B} \left(1 + 2\xi_0\xi - \xi^2 - \frac{1}{6}\xi_0\xi^3 + \frac{1}{4}\xi_0^2\xi^2 + \frac{1}{24}\xi^4 \right) \right\}.$$

$$\text{Deoarece } \frac{D}{R_0^2} \cdot \frac{qR_0^2}{B} = \frac{qD}{B} = q \frac{Eh^3}{12} \cdot \frac{1}{Eh} = q \frac{h^2}{12}, \text{ rezultă:}$$

$$M_2 = \left[4\lambda^4 \frac{D}{R_0^2} (-c_1\eta_1 - c_2\eta_2) + \frac{qh^2}{12} \left(1 + 2\xi_0\xi - \xi^2 - \frac{1}{6}\xi_0\xi^3 + \frac{1}{4}\xi_0^2\xi^2 + \frac{1}{24}\xi^4 \right) \right] \cos\theta.$$

Deducerea ultimei relații din (6.225):

- din relația (6.224) rezultă:

$$N = -\frac{D}{R_0^2} \cdot \frac{\partial^2 w}{\partial\xi\partial\theta} = -\frac{D}{R_0^2} \cdot \frac{\partial^2}{\partial\xi\partial\theta} \left\{ \left[4\lambda^4(-c_1\eta_1 - c_2\eta_2) + \frac{qR_0^2}{B} \left(1 + 2\xi_0\xi - \xi^2 - \frac{1}{6}\xi_0\xi^3 + \frac{1}{4}\xi_0^2\xi^2 + \frac{1}{24}\xi^4 \right) \right] \cos\theta \right\} =$$

$$= \frac{D}{R_0^2} \left\{ \left[4\lambda^4(-c_1\eta_1 - c_2\eta_2) \right] + \frac{qR_0^2}{B} \left(2\xi_0 - 2\xi - \frac{1}{2}\xi_0\xi^2 + \frac{1}{2}\xi_0^2\xi + \frac{1}{6}\xi^3 \right) \sin\theta \right\} =$$

ANEXA VI

Comentarii la relațiile de calcul static al rezervoarelor

$$= \frac{D}{R_0^2} \left\{ 4\lambda^4 (c_1\lambda(\eta_1 + \eta_2) - c_2\lambda(\eta_1 - \eta_2)) + \right. \\ \left. + \frac{qR_0^2}{B} \left(2\xi_0 - 2\xi - \frac{1}{2}\xi_0\xi^2 + \frac{1}{2}\xi_0^2\xi + \frac{1}{6}\xi^3 \right) \sin \theta \right\};$$

deoarece $\frac{D}{R_0^2} \cdot \frac{qR_0^2}{B} = \frac{gh^2}{12}$ se obține:

$$N = \left\{ 4\lambda^5 \frac{D}{R_0^2} [c_1(\eta_1 + \eta_2) - c_2(\eta_1 - \eta_2)] + \right. \\ \left. + \frac{gh^2}{12} \left[2(\xi_0 - \xi) + \frac{1}{2}(\xi_0^2\xi - \xi_0\xi^2) + \frac{1}{6}\xi^3 \right] \right\} \sin \theta.$$

Deducerea formulei pentru M_2 [penultima din (6.228)]:

- din (6.225) rezultă:

$$M_2 = \left[4\lambda^4 \frac{D}{R_0^2} (-c_1\eta_1 - c_2\eta_2) + \frac{gh^2}{12} \left(1 + 2\xi_0\xi - \xi^2 - \frac{1}{6}\xi_0\xi^3 + \right. \right. \\ \left. \left. + \frac{1}{4}\xi_0^2\xi^2 + \frac{1}{24}\xi^4 \right) \right] \cos \theta.$$

Înlocuind c_1, c_2 din (6.227), rezultă:

$$M_2 = \left\{ 4\lambda^4 \frac{D}{R_0^2} \left[-\frac{qR_0}{4B\lambda^4} \eta_1 - \frac{qR_0}{4B\lambda^4} \left(1 + \frac{2\xi_0}{\lambda} \right) \eta_2 \right] + \right.$$

ANEXA VI

Comentarii la relațiile de calcul static al rezervoarelor

$$+ \frac{qh^2}{12} \left(1 + 2\xi_0\xi - \xi^2 - \frac{1}{6}\xi_0\xi^3 + \frac{1}{4}\xi_0^2\xi^2 + \frac{1}{24}\xi^4 \right) \Bigg\} \cos \theta = \\ = \frac{gh^2}{12} \left[-\eta_1 - \left(1 + \frac{2\xi_0}{\lambda} \right) \eta_2 + 1 + 2\xi_0\xi - \xi^2 - \frac{1}{6}\xi_0\xi^3 + \right. \\ \left. + \frac{1}{4}\xi_0^2\xi^2 + \frac{1}{24}\xi^4 \right] \cos \theta.$$

Deducerea formulei pentru N [ultima din (6.228)]:

$$N = \left\{ 4\lambda^5 \frac{D}{R_0^2} [c_1(\eta_1 + \eta_2) - c_2(\eta_1 - \eta_2)] + \frac{qh^2}{12} [2(\xi_0 - \xi) + \right. \\ \left. + \frac{1}{2}(\xi_0^2\xi - \xi_0\xi^2) + \frac{1}{6}\xi^3] \right\} \sin \theta = \\ = \left\{ 4\lambda^5 \frac{D}{R_0^2} \left[\frac{qR_0^2}{4B\lambda^4} (\eta_1 + \eta_2) - \frac{qR_0^2}{4B\lambda^4} \left(1 + \frac{2\xi_0}{\lambda} \right) (\eta_1 - \eta_2) \right] + \right. \\ \left. + \frac{qh^2}{12} \left[2(\xi_0 - \xi) + \frac{1}{2}(\xi_0^2\xi - \xi_0\xi^2) + \frac{1}{6}\xi^3 \right] \right\} \sin \theta = \\ = \frac{qh^2}{12} \left\{ \lambda \left[(\eta_1 + \eta_2) - \left(1 + \frac{2\xi_0}{\lambda} \right) (\eta_1 - \eta_2) \right] + \right. \\ \left. + 2(\xi_0 - \xi) + \frac{1}{2}(\xi_0^2\xi - \xi_0\xi^2) + \frac{1}{6}\xi^3 \right\} \sin \theta.$$

16) Dezvoltarea unor formule:

$$\text{Ecuația (6.263)} \quad \frac{d^4 w}{d\rho^4} + \frac{2}{\rho} \cdot \frac{d^3 w}{d\rho^3} - \frac{1}{\rho^2} \cdot \frac{d^2 w}{d\rho^2} + \frac{1}{\rho^3} \cdot \frac{dw}{d\rho} + \frac{k}{D} w = 0$$

ANEXA VI

Comentarii la relațiile de calcul static al rezervoarelor

se scrie în formă echivalentă:

$$\left(\frac{d^2}{d\rho^2} + \frac{1}{\rho} \cdot \frac{d}{d\rho} \right) \left(\frac{d^2 w}{d\rho^2} + \frac{1}{\rho} \cdot \frac{dw}{d\rho} \right) + \frac{k}{D} w = 0. \quad (6.268)$$

Într-adevăr, avem:

$$\begin{aligned} & \frac{d^2}{d\rho^2} \left(\frac{d^2 w}{d\rho^2} \right) + \frac{d^2}{d\rho^2} \left(\frac{1}{\rho} \cdot \frac{dw}{d\rho} \right) + \frac{1}{\rho} \cdot \frac{d}{d\rho} \left(\frac{d^2 w}{d\rho^2} \right) + \frac{1}{\rho} \cdot \frac{d}{d\rho} \left(\frac{1}{\rho} \cdot \frac{dw}{d\rho} \right) + \frac{k}{D} w = \\ & = \frac{d^4 w}{d\rho^4} + \frac{d}{d\rho} \left(-\frac{1}{\rho^2} \cdot \frac{dw}{d\rho} + \frac{1}{\rho} \cdot \frac{d^2 w}{d\rho^2} \right) + \frac{1}{\rho} \cdot \frac{d^3 w}{d\rho^3} + \\ & + \frac{1}{\rho} \left(-\frac{1}{\rho^2} \cdot \frac{dw}{d\rho} + \frac{1}{\rho} \cdot \frac{d^2 w}{d\rho^2} \right) + \frac{k}{D} w = \\ & = \frac{d^4 w}{d\rho^4} + \frac{2}{\rho^3} \cdot \frac{dw}{d\rho} - \frac{1}{\rho^2} \cdot \frac{d^2 w}{d\rho^2} - \frac{1}{\rho^2} \cdot \frac{d^2 w}{d\rho^2} + \frac{1}{\rho} \cdot \frac{d^3 w}{d\rho^3} + \frac{1}{\rho} \cdot \frac{d^3 w}{d\rho^3} - \\ & - \frac{1}{\rho^3} \cdot \frac{dw}{d\rho} + \frac{1}{\rho^2} \cdot \frac{d^2 w}{d\rho^2} + \frac{k}{D} w = \\ & = \frac{d^4 w}{d\rho^4} + \frac{2}{\rho} \cdot \frac{d^3 w}{d\rho^3} - \frac{1}{\rho^2} \cdot \frac{d^2 w}{d\rho^2} + \frac{1}{\rho^3} \cdot \frac{dw}{d\rho} + \frac{k}{D} w, \end{aligned}$$

de unde rezultă asertiunea.

Acum, ecuația (6.268) se aduce la o formă mai simplă prin schimbarea de variabilă

$$\varphi = \frac{\rho}{S} \quad (6.269)$$

ANEXA VI

Comentarii la relațiile de calcul static al rezervoarelor

$$\text{Într-adevăr, } \frac{dw}{d\rho} = \frac{dw}{d\varphi} \cdot \frac{d\varphi}{d\rho} = \frac{dw}{d\varphi} \cdot \frac{1}{S}, \text{ adică } \frac{d(\quad)}{d\rho} = \frac{1}{S} \cdot \frac{d(\quad)}{d\varphi},$$

$$\text{apoi } \frac{d^2}{d\rho^2} = \frac{d}{d\rho} \left(\frac{d}{d\rho} \right) = \frac{1}{S} \cdot \frac{d}{d\varphi} \left(\frac{d}{d\rho} \right) = \frac{1}{S} \cdot \frac{d}{d\varphi} \left(\frac{1}{S} \cdot \frac{d}{d\varphi} \right) = \frac{1}{S^2} \cdot \frac{d^2}{d\varphi^2};$$

$$\text{se poate scrie: } \frac{d^2(\quad)}{d\rho^2} = \frac{1}{S^2} \cdot \frac{d^2(\quad)}{d\varphi^2}.$$

Înlocuind în (6.268), rezultă:

$$\left(\frac{1}{S^2} \cdot \frac{d^2}{d\varphi^2} + \frac{1}{S} \cdot \frac{1}{\varphi} \cdot \frac{1}{S} \cdot \frac{d}{d\varphi} \right) \left(\frac{1}{S^2} \cdot \frac{d^2 w}{d\varphi^2} + \frac{1}{S} \cdot \frac{1}{\varphi} \cdot \frac{1}{S} \cdot \frac{dw}{d\varphi} \right) + \frac{1}{S^4} w = 0;$$

după simplificarea cu $\frac{1}{S^4}$, aceasta devine:

$$\left(\frac{d^2}{d\varphi^2} + \frac{1}{\varphi} \cdot \frac{d}{d\varphi} \right) \left(\frac{d^2 w}{d\varphi^2} + \frac{1}{\varphi} \cdot \frac{dw}{d\varphi} \right) + w = 0 \quad (6.270)$$

sau, în scriere operatorială,

$$L L(w) + w = 0 \quad (6.271)$$

sau încă, sub formele echivalente (în baza liniarității lui L):

$$L [L(w) + iw] - i [L(w) + iw] = 0 \quad (6.272)$$

sau

$$L [L(w) - iw] + i [L(w) - iw] = 0 \quad (6.273)$$

ANEXA VI

Comentarii la relațiile de calcul static al rezervoarelor

Ecuția $L(w) + iw = 0$ (6.274) sau $\frac{d^2 w}{d\varphi^2} + \frac{1}{\varphi} \cdot \frac{dw}{d\varphi} + iw = 0$

(6.276) se aduce la forma cu coeficienți reali prin transformarea de variabilă $\xi = \varphi\sqrt{i}$.

Într-adevăr, $\frac{d}{d\varphi} = \frac{d}{d\xi} \cdot \frac{d\xi}{d\varphi} = \frac{d}{d\xi} \sqrt{i}$,

$\frac{d^2}{d\varphi^2} = \frac{d}{d\varphi} \left(\frac{d}{d\varphi} \right) = \sqrt{i} \frac{d}{d\xi} \left(\frac{d}{d\xi} \sqrt{i} \right) = i \frac{d^2}{d\xi^2}$ astfel încât ecuația (6.276)

capătă forma $i \frac{d^2 w}{d\xi^2} + \frac{\sqrt{i}}{\xi} \cdot \frac{dw}{d\xi} \sqrt{i} + iw = 0$, iar după simplificare, rezultă

$\frac{d^2 w}{d\xi^2} + \frac{1}{\xi} \cdot \frac{dw}{d\xi} + w = 0$ (Bessel) (6.277)

17) Comentariu la sistemul (6.310) și soluția sa (6.311):

- impunând condițiile încărcării conturului, după (6.306) în loc de (6.310), vom avea sistemul:

$$\begin{cases} c_3 \left(g_0(\lambda) - \frac{1}{\lambda} f_0'(\lambda) \right) - c_4 \left(f_0(\lambda) + \frac{1}{\lambda} g_0'(\lambda) \right) = 0 \\ c_3 g_0'(\lambda) - c_4 f_0'(\lambda) = -\frac{Q_0 S^3}{D} \end{cases}$$

iar coeficienții vor fi

$$c_{3Q} = -\frac{Q_0 S^3}{D} \cdot \frac{f_0(\lambda) + \frac{1}{\lambda} g_0'(\lambda)}{A}, \quad c_{4Q} = -\frac{Q_0 S^3}{D} \cdot \frac{g_0(\lambda) - \frac{1}{\lambda} f_0'(\lambda)}{A}$$

REFERINȚE BIBLIOGRAFICE

- /1/ **Mîrșu Ovidiu, Friedrich Richard**,
Construcții industriale speciale din beton armat, EDP,
București, 1975.
- /2/ **Avram C.**,
Betonul armat în România, ET, București, 1987.
- /3/ **Baikov V.N.**,
Jelezobetonnye Konstrukții, Spețialnii Kurs, Strojizdat,
Moskva, 1974.
- /4/ **Prișcu Radu, Popovici Adr., Stematiu Dan, Ilie Lucian, Stere C.**,
Ingineria seismică a construcțiilor hidrotehnice,
EDP, București, 1980.
- /5/ **Oneț Traian**,
Betonul parțial precomprimat, Ed. Casa Cărții de Știință,
Cluj - Napoca, 1993
- /6/ **Popăescu Augustin, Croitoru George, Alboi Violeta**,
Cod de proiectare pentru structuri din beton. Recipienți din
beton armat și beton precomprimat, Faza I (anteproiect),
INCERC, București, 1998.

Cap. 6. Referințe bibliografice

- /7/ **Tertea Igor**,
Betonul precomprimat. Bazele proiectării, ET, București, 1981.
- /8/ **Hangan Mihail**,
Construcții de beton armat. Introducere în alcătuirea și calculul structurilor statice, ET, București, 1963.
- /9/ **Mihul Anatolie**,
Construcții de beton armat, EDP, București, 1969.
- /10/ **Mihul Anatolie**,
Procedee de dirijare a eforturilor inițiale introduse în elementele de beton în vederea măririi capacității de rezistență și îmbunătățirii comportării lor în exploatare, Teză de doctorat, Institutul Politehnic Iași, 1972.
- /11/ **Bucur Ildikó**,
Structuri speciale din beton armat (buncăre, silozuri, rezervoare, castele de apă, turnuri de răcire), Institutul Politehnic, Cluj – Napoca, 1980.
- /12/ **Mazilu Panaite, Țopa N., Ieremia Mircea**,
Aplicarea teoriei elasticității și a plăcilor în calculul construcțiilor, ET, București, 1986.
- /13/ **Mourachev V., Sigalov E., Baikov V.**,
Résistance du béton armé. Éléments des constructions en béton armé, Ed. Mir, Moscou, 1971.
- /14/ **xxx**
Normativ departamental pentru clasificarea, gruparea și evaluarea acțiunilor pentru construcții hidrotehnice, PE 729/89, I.S.P.H., București, 1989.

Cap. 6. Referințe bibliografice

- /15/ **Beleş A. Aurel, Soare Mircea**,
Calculul plăcilor curbe subțiri (formule, abace, tabele, exemple de calcul), ET, București, 1969.
- /16/ **Guerrin A.**,
Traité de béton armé, tome VIII, Ouvrages enterrés, Ed. Dunod, Paris, 1970.
- /17/ **Szalontay Coloman Andrei**,
Rezervoare precomprimate din elemente spațiale prefabricate, Teză de doctorat, Institutul Politehnic Iași, 1984.
- /18/ **Zaicescu Dan**,
Rezervoare din elemente prefabricate în formă de învelitori subțiri, Teză de doctorat, Institutul Politehnic Cluj – Napoca, 1978.
- /19/ **Marinescu Șt., Diaconu Daniel, Ungureanu N., Vrabie M.**,
Determinarea solicitărilor din acțiunea seismică pentru rezervoare cilindrice supraterane de beton, cu ax vertical, ancorate, cu manta flexibilă (colaborare la contractul de cercetare științifică nr. 138/1998 - INCERC București), INCERC Filiala Iași, martie, 1998.
- /20/ **Hobjilă Vasile**,
Structures parasismiques en béton précontraint, III-e partie, vol. XIII, 54 pages, Stage organisé à ALGER avec la participation de L'Institut Roumain de Consultation (ROMCONSULT) pour L'Organisme de Contrôle Technique de la Construction - CTC, ALGER, nov., 1983.